

**EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DE LA FUENTE DE SUMINISTRO
ENERGÉTICO PARA LA TRUCHERA UBICADA EN EL MUNICIPIO DE URRAO
ANTIOQUIA EMPLEANDO SOFTWARE DE DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE
SISTEMAS ENERGÉTICOS.**

**JUAN GABRIEL MONSALVE ZAPATA
SERGIO ANDRÉS LÓPEZ DE MESA LONDOÑO**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2024**

**EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DE LA FUENTE DE SUMINISTRO
ENERGÉTICO PARA LA TRUCHERA UBICADA EN EL MUNICIPIO DE URRAO
ANTIOQUIA EMPLEANDO SOFTWARE DE DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE
SISTEMAS ENERGÉTICOS.**

**JUAN GABRIEL MONSALVE ZAPATA
SERGIO ANDRÉS LÓPEZ DE MESA LONDOÑO**

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA

**ASESORES
SANTIAGO BUSTAMANTE MESA
PHD. EN INGENIERÍA
JUAN DAVID VELÁSQUEZ GÓMEZ
MSC. GERENCIA DE PROYECTOS**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2024**

Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1 Planteamiento del problema | 9 |
| 1.1 Descripción | 9 |
| 1.2 Formulación | 11 |
| 2 Justificación | 12 |
| 3 Objetivos | 15 |
| 3.1 Objetivo general | 15 |
| 3.2 Objetivos específicos | 15 |
| 4 Glosario | 16 |
| 5 Marco Teórico | 22 |
| 5.1.1 Estudios previos a la construcción | 22 |
| 5.2 Central hidroeléctrica a filo de agua | 25 |
| 5.2.1 Equipos electromecánicos | 25 |
| 5.3 Sistemas Fotovoltaicos | 28 |
| Un sistema fotovoltaico es un sistema eléctrico especial que produce energía a partir de una fuente renovable e inagotable: el sol (ENEL X, 2023). | 28 |
| 5.3.1 Principales equipos | 29 |
| 5.4 Software HOMER Pro | 35 |
| 6 Estado del Arte | 37 |
| 7 Descripción Técnica del proyecto | 41 |
| 8 Metodología | 43 |
| 8.1 Tipo de proyecto | 43 |
| 8.2 Método | 43 |
| 8.3 Instrumentos de recolección de información | 43 |
| 8.4 Desarrollo metodológico | 43 |
| 9 Resultados del proyecto | 45 |
| 9.1 Prediseño y dimensionamiento para el Estudio de Viabilidad Técnico-Económica de la Picocentral Hidroeléctrica | 45 |
| 9.2 Prediseño y dimensionamiento para el Estudio de Viabilidad Técnico-Económica de la generación Fotovoltaica | 56 |
| 9.3 Comparación de los Subsistemas de Generación: Solar Fotovoltaica, Hidroeléctrica y Suministro de la Red | 66 |
| 9.4 Determinación del Sistema Óptimo de Suministro Energético para la Truchera | 81 |
| 9.5 Valor agregado de autogeneración con energías renovables | 85 |
| 10 Conclusiones | 87 |
| | 3 |

11 Referencias
12 Anexos

89
104

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Turbina Pelton. | 26 |
| Figura 2. Turbina Turgo. | 27 |
| Figura 3. Turbina Propeller o Hélice. | 28 |
| Figura 4. Turbina Propeller o Hélice. | 28 |
| Figura 5. Paneles Fotovoltaicos. | 29 |
| Figura 6. Tela de Células Solares. | 30 |
| Figura 7. Barreras Acústicas Fotovoltaicas. | 31 |
| Figura 8. Tecnología BIPV. | 32 |
| Figura 9. Regulador Solar. | 32 |
| Figura 10. Inversor para energía solar. | 33 |
| Figura 11. Baterías para energía solar. | 34 |
| Figura 12. Medidor Bidireccional. | 35 |
| Figura 13. Software HOMER Pro. | 36 |
| Figura 14. Actividades asociadas a la metodología requerida para el desarrollo del proyecto. | 44 |
| Figura 15. Imagen de la Truchera Urrao Antioquia. | 45 |
| Figura 16. Imagen de verificación de bocatomas y medidas de estos. | 47 |
| Figura 17. Imagen del tanque desarenador quebrada Montenegro | 47 |
| Figura 18. Medición con analizador de redes. | 49 |
| Figura 19. Imagen del recibo de servicios públicos de la truchera. | 52 |
| Figura 20. Resumen para turbina “Hydro” en HOMER ProFuente: HOMER Pro. | 56 |
| Figura 21. Imagen de Geolocalización de la truchera. | 57 |
| Figura 22. Imagen. Sitio tentativo para ubicar los paneles solares. | 58 |
| Figura 23. Nombre | 60 |
| Figura 24. Nombre | 61 |
| Figura 25. Imagen de Geolocalización en HOMER Pro. | 65 |
| Figura 26. Resumen Paneles Fotovoltaicos “PV” en HOMER Pro. | 65 |
| Figura 27. Resumen del Inversor “Converter” en HOMER Pro. | 66 |
| Figura 28. Gráfico de barras para la carga proyectada. | 67 |
| Figura 29. Dimensionamiento de la carga en el software Homer pro | 67 |
| Figura 30. Arquitectura de los sistemas en HOMER Pro. | 68 |
| Figura 31. Arquitectura de sistema sugerido PV y Red. | 68 |
| Figura 32. Combinación de sistemas evaluados en el software Homer pro | 69 |
| Figura 33. Gráfico de resultados financieros caso Red. | 70 |
| Figura 34. Gráfico de consumo eléctrico caso Red. | 70 |
| Figura 35. Gráfico de penetración de la generación fotovoltaica.Fuente. HOMER Pro. | 71 |
| | 5 |

| | |
|--|----|
| Figura 36. Gráfico de resultados financieros de la generación fotovoltaica. | 73 |
| Figura 37. Gráfico de penetración de la generación fotovoltaica e hidráulica. Fuente. HOMER Pro. | 75 |
| Figura 38. Gráfico de resultados financieros de generación fotovoltaica e hidroeléctrica. | 77 |
| Figura 39. Gráfico de penetración de la generación del sistema hidroeléctrico. Fuente. HOMER Pro. | 78 |
| Figura 40. Gráfico de resultados financieros generación hidroeléctrica. Fuente. HOMER Pro. | 80 |
| Figura 41. Gráfico de penetración de la generación fotovoltaica del sistema optimizado. Fuente. HOMER Pro. | 82 |
| Figura 42. Gráfico de resultados financieros del sistema optimizado. Fuente. HOMER Pro. | 84 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Mediciones de altura de la cabeza de fuerza. | 46 |
| Tabla 2. Consumo energético real de la truchera. | 50 |
| Tabla 3. Servicios públicos y tasa representativa del mercado. | 51 |
| Tabla 4. Consumo kWh/mes de la truchera. | 52 |
| Tabla 5. Costos asociados a la generación hidroeléctrica. | 54 |
| Tabla 6. Resumen de los datos para la generación hidráulica. | 55 |
| Tabla 7. Radiación solar. | 59 |
| Tabla 8. Costo estimado del proyecto. | 63 |
| Tabla 9. Resumen de datos para generación fotovoltaica. | 64 |
| Tabla 10. Comportamiento de la generación fotovoltaica. | 72 |
| Tabla 11. Comportamiento de la red eléctrica de generación fotovoltaica e hidroeléctrica. Fuente. HOMER Pro. | 76 |
| Tabla 12. Comportamiento de la red eléctrica de generación hidroeléctrica. | 79 |
| Tabla 13. Configuración de sistemas optimizados. Fuente. HOMER Pro. | 82 |
| Tabla 14. Comportamiento de la red eléctrica del sistema optimizado. Fuente. HOMER Pro. | 83 |

Introducción

La autogeneración de energía eléctrica en Colombia a través de energías alternativas no es una práctica frecuente, a pesar de que el gobierno las ha fomentado mediante políticas y programas de apoyo, sólo se cuenta con 5.729 usuarios entregando excedentes al Sistema Interconectado Nacional; las tecnologías disponibles en el comercio local son limitadas en avances tecnológicos y tienen un alto costo en comparación con mercados internacionales (L.R, 2023).

En esta investigación se analiza la factibilidad de implementar el montaje de un sistema de autogeneración de energía eléctrica, en una finca que cuenta con producción y comercialización de trucha y tiene un alto consumo .

Lo primero que se realizará es un análisis de la demanda energética de la finca, ubicada en el municipio de Urrao Antioquia, además de identificar las posibles fuentes de autogeneración de energía eléctrica y realizar un estudio técnico-económico de éstas, e identificar el método más eficiente para su implementación.

Para esto, se requiere realizar un prediseño en cada uno de los tipos de autogeneración planteados, según los recursos disponibles en la finca y presentar un presupuesto para su montaje y puesta en marcha.

Luego de contar con los datos técnico-económicos, se plantea utilizar el software de dimensionamiento óptimo llamado HOMER Pro, este permitirá realizar una comparación entre estos y el operador de red, así seleccionar el que convenga.

Se debe realizar una investigación y análisis detallado del estado del arte de cada una de las tecnologías que se propone implementar en los prediseños de cada sistema, como, información técnica, equipos, vida útil, mantenimiento y sus tasas de retorno.

1 Planteamiento del problema

A continuación, se presenta el planteamiento del problema de investigación.

1.1 Descripción

Durante el proyecto se busca promover la autonomía energética de una truchera, que se encuentra ubicada en el municipio de Urrao del departamento de Antioquia, esta tiene actualmente un consumo de energía eléctrica promedio de 1000 kWh/mes, los cuales son debido a los procesos de producción, empaque, y refrigeración, siendo este último el de mayor impacto energético.

Mediante una visita a las instalaciones, se pudo notar que, tanto la generación hidráulica como la fotovoltaica se podrían implementar en un proyecto de autogeneración; se puede observar que el lugar cuenta con disponibilidad de recursos hidráulicos, como 2 quebradas (Santa Isabel y Montenegro) que pasan por los predios de la propiedad, de las cuales ya se capta una parte, para el sostenimiento de los peces. También se cuenta con superficies disponibles para la posible implementación de generación mediante sistemas fotovoltaicos, donde en caso de instalar los paneles sobre los estanque, brindarán adicionalmente, la sombra artificial necesaria para los peces, la cual es requerida para conservar las propiedades físicas del agua.

En la parte tecnológica la autogeneración de energía limpia implica la implementación de tecnologías avanzadas como paneles solares y energía hidroeléctrica a través de microturbinas, esto impulsa el desarrollo de tecnologías a pequeña escala para autoabastecerse energéticamente.

Colombia es un país donde los centros de generación están normalmente muy alejados de los centros de consumo como lo son las grandes ciudades, por lo que las pérdidas presentadas en las líneas de transmisión convencionales por efectos capacitivos, inductivos, corona, piel, Joule, entre otros; son excesivamente altos e insostenibles. En términos tecnológicos la autogeneración contemplada en este documento ayuda a mitigar este problema.

En la parte científica la autogeneración de energía eléctrica a partir de fuentes renovables como las microcentrales hidroeléctricas a filo de agua o autogeneración fotovoltaica es esencial

para reducir gases de efecto invernadero y combatir el cambio climático, este es uno de los desafíos científicos difíciles de resolver en el siglo XXI a nivel mundial. La capacidad efectiva neta de generación en Colombia para el año 2023 es de 18.777 MW (enero 2023), de los cuales 66,8% corresponden a energía hidráulica, el 30,5% a energía térmica, lo que sólo deja el 2,7% para generación de energía por medios alternativos (Actualidad, 2023).

La investigación en torno a la autogeneración de energía eléctrica contribuye al avance de la ciencia y la ingeniería, lo que lleva a mejorar la eficiencia de sistemas de micro y pico generación, incentivando la implementación masiva a futuro (Actualidad, 2023).

En la parte práctica la autogeneración proporciona autonomía ante cortes de energía, desastres naturales y otros eventos imprevistos, sumando importancia, al asegurar que las necesidades básicas se puedan mantener en situaciones de emergencia. Adicionalmente se pueden lograr beneficios económicos a mediano y largo plazo, haciendo uso de recursos ya disponibles, como son el caudal de las quebradas y la energía solar (Ortiz Flórez, 2011).

En la actualidad, el suministro eléctrico de Empresas Públicas de Medellín (EPM) enfrenta varios desafíos significativos que afectan tanto la estabilidad como la eficiencia del servicio. En primer lugar, las fluctuaciones económicas, incluidas las variaciones en los costos de producción y distribución de la energía, han generado aumentos en las tarifas, impactando a los consumidores. Además, debido a la dificultad de acceso a la región, cuando se presentan daños o desconexiones en la red, su reparación se puede prolongar de 5 a 6 días normalmente. A esto se suman los impactos ambientales derivados de la construcción y operación de grandes proyectos hidroeléctricos, que afectan los ecosistemas locales. Estos problemas resaltan la necesidad de explorar alternativas energéticas más sostenibles y diversificadas que puedan complementar el suministro de EPM, minimizando tanto los costos como los daños al medio ambiente.

Es importante invertir conocimientos de ingeniería y tecnología en el área rural de Colombia ya que es fundamental para el desarrollo sostenible, introduciendo prácticas amigables con el medio ambiente en la generación de energía eléctrica y que involucre el uso racional y eficiente.

Se realizará el estudio técnico económico para determinar cuál es la fuente de autogeneración adecuada para garantizar el suministro eléctrico necesario para el desarrollo de las labores diarias de la truchera, todo esto mediante la comparación a través del software de dimensionamiento óptimo de sistemas energéticos, HOMER Pro.

1.2 Formulación

A continuación, se muestra la pregunta de investigación del proyecto.

¿Es posible, por medio de una investigación, establecer la evaluación técnico económica de la fuente de suministro energético para la truchera ubicada en el municipio de Urrao Antioquia empleando software de dimensionamiento óptimo de sistemas energéticos?

2 Justificación

La investigación se debe realizar porque mediante la comparación de los estudios técnico económicos, se puede sugerir un sistema adecuado de autogeneración de energía eléctrica hidráulica o fotovoltaica, que permita entregar la cantidad necesaria para abastecer el suministro de la truchera y que muestre los costos de la inversión y la tasa de retorno. De ahí lo conveniente de la investigación porque determina la tecnología de generación que se debe implementar en la truchera o si lo conveniente es seguir comprando el suministro al prestador de red.

Desde lo técnico permite contar con un prediseño para la implementación de su propia generación hidráulica o fotovoltaica de energía eléctrica; en la parte económica tener el presupuesto de la inversión inicial y el tiempo en que se lograría el retorno de la inversión.

El estudio técnico económico es importante en la parte práctica porque ayuda a determinar cuánta de la demanda de la truchera es cubierta mediante el proyecto de autogeneración, realiza un análisis de costos y beneficios que pueden demostrar que la inversión en la autogeneración de energía eléctrica a partir de fuentes renovables es económicamente viable a mediano o largo plazo, describe los equipos y sistemas requeridos para la implementación de la micro central hidroeléctrica o del sistema fotovoltaico, desarrolla un plan detallado para la implementación de un proyecto que incluye cronogramas y actividades específicas, y contempla la vida útil del sistema.

A nivel social el desarrollo del estudio técnico económico sirve a las personas que buscan una opción en las energías alternativas, como referencia para implementar su propio sistema de autogeneración y crear conciencia de la falta que hace en Colombia la tecnificación del área rural (el campo); con la implementación de un proyecto como este, se puede generar empleo en la construcción y el mantenimiento, al mismo tiempo que la necesidad de capacitarse de los habitantes regionales.

A nivel tecnológico la implementación del estudio técnico económico sirve para fomentar el uso de tecnologías innovadoras en la implementación de autogeneración de energía eléctrica en las zonas rurales, a su vez el desarrollo de nuevas tecnologías adaptables a diversos espacios según las condiciones y necesidades de cada usuario.

A nivel ambiental la implementación del estudio técnico económico, sirve para que se haga un uso adecuado de los recursos renovables disponibles, sin hacer cambios ni daños importantes en estos, y evitar el consumo de energía de la red de distribución convencional, la cual se sabe que puede ser generada por múltiples formas no amigables con el medio ambiente.

La generación hidráulica y fotovoltaica son fuentes de energía sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, en comparación con los métodos tradicionales. La investigación en esta área puede ayudar a promover la adopción de tecnologías limpias y a reducir la huella de carbono y al utilizarlas, se contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que es beneficioso tanto para el medio ambiente como para la sostenibilidad a largo plazo.

Desde una perspectiva de innovación, el software HOMER Pro se presenta como una herramienta valiosa en la toma de decisiones y optimización de sistemas energéticos, al permitir la simulación y comparación de diversas combinaciones de fuentes de energía renovable, como solar e hidroeléctrica. Su capacidad para modelar y evaluar el rendimiento técnico y económico de estos sistemas facilita la identificación de soluciones más eficientes y rentables para proyectos de autogeneración. Además, HOMER Pro no solo optimiza costos, sino que también considera factores clave como la sostenibilidad y la reducción de emisiones de carbono. Este estudio, apoyado en HOMER Pro, puede servir de referencia para futuras investigaciones en áreas rurales, ayudando a replicar proyectos de autogeneración de energía eléctrica en zonas con condiciones similares, contribuyendo al desarrollo sostenible y mejorando la calidad de vida en comunidades aisladas.

El proyecto de autogeneración energética mediante fuentes renovables, como la hidroeléctrica y la solar, contribuirá significativamente a la reducción de la huella de carbono al disminuir la dependencia de fuentes energéticas fósiles y no renovables como las utilizadas en la generación tradicional cuando se presentan sequías y desabastecimiento. Al aprovechar recursos naturales locales, como el hídrico en la generación a filo de agua y la radiación solar, se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, promoviendo un modelo de energía limpia y sostenible.

3 Objetivos

A continuación, se puede encontrar el objetivo general y los objetivos específicos para el desarrollo del trabajo de grado.

3.1 Objetivo general

Establecer la evaluación técnico económica de la fuente de suministro energético para la truchera ubicada en el municipio de Urrao Antioquia empleando software de dimensionamiento óptimo de sistemas energéticos.

3.2 Objetivos específicos

- Desarrollar el estudio de viabilidad técnico económico de una picocentral hidroeléctrica por medio de mediciones en campo del caudal para el suministro de energía de una truchera ubicada en el municipio de Urrao Antioquia.
- Desarrollar el estudio de viabilidad técnico económico de una central fotovoltaica por medio de fuentes secundarias para el suministro de energía de una truchera ubicada en el municipio de Urrao Antioquia.
- Encontrar el sistema de suministro óptimo de energía comparando los subsistemas de generación solar fotovoltaica, hidroeléctrica y suministro de energía por parte del Operador de red para establecer un sistema de producción autosostenible energéticamente.

4 Glosario

A continuación, se presenta el glosario asociado al proyecto de investigación

Acometida: derivación de la red local del servicio que llega hasta el registro de corte del inmueble. En edificios de propiedad horizontal o condominios, la acometida llega hasta el registro de corte general (EPM, 2023).

Aforo: procedimiento para medir o estimar la cantidad de agua, energía y gas que normalmente utiliza un usuario, o la cantidad de agua que discurre por una fuente natural o artificial (EPM, 2023).

Alternador: generador eléctrico rotativo destinado a producir fuerzas electromotrices que sean funciones sinusoidales del tiempo (EPM, 2023).

Aportes hídricos probabilísticos: valores esperados para la hidrología a partir de datos históricos (XM, 2023).

Autoconsumos: consumo de servicios públicos domiciliarios efectuado en instalaciones de la Empresa (EPM, 2023).

Autogenerador: persona que produce energía eléctrica para atender sus necesidades exclusivamente y no hace uso de la red pública (EPM, 2023).

Autoproductor: corresponden a los Autogeneradores y Cogeneradores, definidos según las Resoluciones CREG 084 de 1996 y CREG 085 de 1996 y la Resolución CREG 107 de 1998, o en aquellas que las adicionen, modifiquen o sustituyan (XM, 2023).

Banco de baterías eléctricas: conjunto de pilas eléctricas conectadas en serie, en paralelo o en serie-paralelo, diseñadas para ser usadas como fuente de potencia de corriente continua y para suministrar la alimentación de los circuitos de control, medida, protección e instrumentación en las instalaciones eléctricas (EPM, 2023).

Bocatoma: estructura hidráulica que capta el agua desde una fuente (río, arroyo, canal o lago) y la conduce al sistema de acueducto (EPM, 2023).

Capacidad efectiva: máxima cantidad de potencia neta (expresada en valor entero en megavatios) que puede suministrar una unidad de generación en condiciones normales de operación (XM, 2023).

Capacidad o potencia instalada: es la carga instalada o capacidad nominal que puede soportar el componente limitante de una instalación o sistema eléctrico (EPM, 2023).

Capacidad nominal: potencia de diseño de una unidad o planta de generación (XM, 2023).

Carga: potencia eléctrica medida en kW o kVA que es requerida por un elemento que consume energía de una red eléctrica (EPM, 2023).

Casa de máquinas: también se denomina central. Es una estructura construida para alojar los equipos electromecánicos de generación, y puede estar localizada sobre la tierra (casa a cielo abierto), o enterrada a varios cientos de metros (caverna) (EPM, 2023).

Caudal: cantidad de agua que alimenta una central hidroeléctrica proveniente del curso de un río o de un embalse (EPM, 2023).

Caudal ecológico: volumen de agua que se vierte al río durante operación de la central para mantener un caudal mínimo en el sector comprendido entre la presa y el portal de salida del túnel de descarga (EPM, 2023).

Célula fotovoltaica: dispositivo, normalmente a base de silicio, que permite la transformación de la radiación solar en electricidad (EPM, 2023).

Central a filo de agua: central con embalse muy pequeño, que prácticamente utiliza el agua necesaria en las turbinas para su máxima potencia. Si llega un caudal superior por el río, es necesario botar el agua en exceso (EPM, 2023).

Central hidroeléctrica: instalación que aprovecha la energía cinética del agua para producir energía eléctrica. Utiliza una fuente de energía renovable (EPM, 2023).

Central solar: instalación donde se produce electricidad a partir de la radiación solar (EPM, 2023).

Concesión de aguas: es la autorización emitida por la autoridad ambiental a una persona natural o jurídica, pública o privada, para hacer uso, aprovechamiento o explotación de las aguas

subterráneas o superficiales de dominio público, para los usos diferentes de aquellos que se ejercen por ley (EPM, 2023).

Control de frecuencia: mecanismo de control localizado en las unidades para garantizar que la generación siga la demanda. Cuando es control secundario, se trata de señales adicionales con el objeto de llevar la frecuencia a 60 Hz (XM, 2023).

Demanda de energía: Carga en kWh solicitada a la fuente de suministro en el punto de recepción durante un periodo de tiempo determinado (XM, 2023).

Eficiencia energética: relación entre la energía aprovechada y la total utilizada en cualquier proceso de la cadena energética, dentro del marco del desarrollo sostenible y respetando la normatividad vigente sobre medio ambiente y los recursos naturales renovables. Ley 697/2001 (EPM, 2023).

Demanda de potencia: carga en kVA o kW solicitada a la fuente de suministro en el punto de recepción en un momento determinado (EPM, 2023).

Embalse: construcción que tiene la finalidad de detener y desviar el curso natural de un río. Es una muralla o dique que atraviesa el cauce de un río, generalmente en un estrechamiento y aguas abajo de una zona con pendiente pronunciada (rápidos o cascadas), realizada con tierra, piedras, troncos o cemento (EPM, 2023).

Energía fotovoltaica: energía eléctrica que se obtiene de energía electromagnética, principalmente de la que procede del sol, por medio de células fotovoltaicas (EPM, 2023).

Energía hidráulica: energía de una masa de agua debida a su velocidad o a su posición (EPM, 2023).

Energía solar: energía transportada por las ondas electromagnéticas provenientes del sol (EPM, 2023).

Energías renovables: aquellas que se producen de forma continua y son inagotables a escala humana. El sol está en el origen de todas ellas porque su calor provoca en la Tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos, fuente de la energía eólica. El sol ordena el ciclo del agua, causa la evaporación que provoca la formación de nubes y, por tanto, las lluvias. También del sol procede la energía hidráulica. Las plantas se sirven del sol para realizar la

fotosíntesis, vivir y crecer. Toda esa materia vegetal es la biomasa. Por último, el sol se aprovecha directamente en las energías solares, tanto la térmica como la fotovoltaica (EPM, 2023).

Estudio de Impacto Ambiental (EIA): instrumento de planificación ambiental para la toma de decisiones sobre el desarrollo de acciones o proyectos. Lo exige la autoridad ambiental para definir las medidas de preservación, mitigación, control, corrección y compensación de los impactos y efectos ambientales de un proyecto, obra o actividad (EPM, 2023).

Generación de energía eléctrica: producción de energía eléctrica mediante una planta hidráulica o una unidad térmica conectada al Sistema Interconectado Nacional, bien sea que desarrolle esa actividad en forma exclusiva o en forma combinada con otra u otras actividades del sector eléctrico (EPM, 2023).

Generación filo de agua: generación hidráulica de las plantas sin capacidad de regulación (XM, 2023).

Impacto ambiental: cualquier alteración en el sistema ambiental físico, químico, biológico, cultural y socioeconómico que pueda ser atribuido a actividades humanas relacionadas con las necesidades de un proyecto (EPM, 2023).

Licencia ambiental: autorización que otorga la autoridad ambiental competente para la ejecución de un proyecto, obra o actividad que, de acuerdo con la ley y los reglamentos, pueda producir deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente, o introducir modificaciones considerables o notorias al paisaje.

El beneficiario de la licencia está sujeto al cumplimiento de los requisitos, términos, condiciones y obligaciones que la misma establezca en relación con la prevención, mitigación, corrección, compensación y manejo de los efectos ambientales del proyecto, obra o actividad autorizada (EPM, 2023).

Minihidráulica: las centrales hidroeléctricas aprovechan la energía de un curso de agua como consecuencia de la diferencia de nivel entre dos puntos. Hay una gran variedad de instalaciones, pero se podrían clasificar en tres grupos: centrales de agua fluvente, de pie de presa y de canal de

riego o abastecimiento. Se consideran centrales mini-hidráulicas aquellas cuya potencia es igual o inferior a 10 MW (EPM, 2023).

Placa fotovoltaica: conjunto de células fotovoltaicas organizadas para ser utilizadas como generador eléctrico (EPM, 2023).

Planta hidroeléctrica: destinada a transformar energía hidráulica en energía eléctrica (EPM, 2023).

Radiación solar: radiación electromagnética producida por el sol con una temperatura equivalente a 5777 K (EPM, 2023).

Servomotor hidráulico: amplificador de potencia hidráulica controlado generalmente por una válvula piloto y un actuador. En las centrales hidroeléctricas se emplea para comandar las válvulas de admisión, los distribuidores de las turbinas y deflectores, entre otros (EPM, 2023).

Solar fotovoltaica: energía basada en el llamado efecto fotovoltaico que se produce al incidir la luz sobre materiales semiconductores. De esta forma se genera un flujo de electrones en el interior de esos materiales y una diferencia de potencial que puede ser aprovechada. La unidad base es la célula fotovoltaica. Las células se agrupan en paneles sobre una estructura que suele ser de metales ligeros como el aluminio. Los paneles permiten generar electricidad en emplazamientos aislados donde no llega la red eléctrica. Esa electricidad es acumulada en baterías.

Pero hay otras aplicaciones conectadas a la red que incluyen grandes centrales y pequeñas instalaciones. En ambos casos, la energía producida es vertida a la red eléctrica. La fotovoltaica es la base energética de los satélites artificiales y de pequeños instrumentos de uso cotidiano que funcionan gracias a la radiación solar, como relojes o calculadoras (EPM, 2023).

Trampa de gravas: recinto que, haciendo parte de una conducción en baja presión, se ubica en la parte más baja de la sección, permitiendo acumular por fuera de las líneas de flujo de la conducción, las gravas o arenas gruesas que contiene el flujo (EPM, 2023).

Tubería: ducto de sección circular para el transporte de agua y gas (EPM, 2023).

Turbina hidráulica: nombre genérico que se da a la mayoría de las turbo-máquinas motoras. Son máquinas a través de las cuales pasa un fluido en forma continua y éste le entrega su energía

a través de un rodete con paletas o álabes que aprovecha la energía del fluido que pasa a través de ella para producir un movimiento de rotación que transferido mediante un eje, mueve directamente una máquina o bien un generador que transforma la energía mecánica en eléctrica. En cuanto a su modo de funcionamiento, se pueden clasificar en dos grupos: turbinas de acción y turbinas de reacción (EPM, 2023).

Unidad turbogeneradora: grupo motriz de generación de electricidad, constituido por un acoplamiento entre una turbina y un generador eléctrico (EPM, 2023).

Válvula de admisión a la turbina: se encuentra antes de la turbina en una central hidroeléctrica y sirve para cortar el flujo de agua de la conducción, durante la operación normal (EPM, 2023).

HOMER Pro: HOMER examina todas las combinaciones posibles de tipos de sistemas en una sola ejecución y luego clasifica los sistemas según la variable de optimización elegida.

HOMER Pro representa un nuevo algoritmo de optimización que simplifica significativamente el proceso de diseño para identificar opciones de menor costo para microrredes u otros sistemas de energía eléctrica de generación distribuida (HOMER Pro, 2023).

5 Marco Teórico

A continuación, se presenta el marco teórico del proyecto de investigación y dentro del cual se puede encontrar información asociada con los estudios previos requeridos para la construcción de una central de generación de energía, estudios de fuente primaria de energía de acuerdo con la central que se quiera implementar, principales equipos eléctricos, mecánicos y electromecánicos asociados, entre otros aspectos.

5.1.1 Estudios previos a la construcción

El propósito de esta etapa es proveer información suficiente para confirmar la viabilidad (o practicidad) de cualquier alternativa de desarrollo propuesta, así como comparar si existe más de una, este proceso se alberga en la etapa de Prefactibilidad. Mediante el uso de esta información se construyen los diseños preliminares o conceptuales y se realizan estimaciones, las cuales son razonablemente confiables. Dichos estudios se describen a continuación (Llangato et al., 2023).

Estudio de Hidrología

En los estudios Hidrológicos se busca conocer y comprender lo necesario para obtener mediante mediciones en sitio o predicciones estadísticas el comportamiento del cauce que condiciona el diseño de la micro central.

- Datos generales de lluvias y escorrentía superficial.
- Datos principales del flujo del río: Superficie de la cuenca (topografía y/o batimetría), clima, régimen fluvial, vegetación, relieves y pendientes, constitución de los suelos y subsuelos, caudales.
- Características de las crecientes del caudal.

Una vez se tienen los detalles básicos para el desarrollo del diseño, es necesario determinar, lo más completamente posible, todo el rango de variación de las condiciones hidrológicas para las cuales deben ser diseñadas las estructuras.

Dichas condiciones se obtienen principalmente mediante la determinación de las cotas naturales del río, las cuales son propias de las diferentes condiciones del flujo. Lo anterior

se ve expresado en las curvas de caudal vs nivel (o curvas de caudales). Es muy relevante entender que la precisión de estas mediciones afecta en gran medida el grado de seguridad con que se diseña cada estructura, así como su costo. Junto a lo anterior, esta información permite una mejor planificación y estimación de tiempos de construcción y trabajos en general (Llangato et al., 2023).

Estudio de radiación solar

La radiación solar se define como la energía originada en el Sol y medida en la superficie de la Tierra; es un recurso natural que ha estado presente a través de la historia y ha permitido la supervivencia humana. Esta energía se cuantifica por medio de la radiación solar global, una magnitud que representa la cantidad de energía electromagnética incidente en una superficie por unidad de tiempo, por unidad de área, y tiene una magnitud constante fuera de la atmósfera terrestre, con un valor aproximado de 1368 W m^{-2} .

Por otra parte, la insolación se refiere a la radiación incidente sobre un área en determinado tiempo, normalmente expresada en kilovatios hora por metro cuadrado por día ($\text{kWh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$). Debido a los elementos presentes en la atmósfera como el oxígeno, el hidrógeno, el ozono, el dióxido de carbono, el metano y también factores como las nubes, el vapor de agua y algunos otros más, el valor de la radiación solar global en la superficie terrestre varía haciendo que su comportamiento sea diferente para diferentes intervalos de tiempo.

Sin embargo, análisis como Leal, F. A. and Hernandez Cely, M. M. "Study of wind and solar potential in Cucuta, Norte de Santander," *Rev. Colomb. Technol. Av.* vol. 2, pp. 27-33, 2013. y Che, H. Z., Shi, G. Y., Zhang, X. Y., Arimoto, R., Zhao, J. Q., Xu, L., Wang, B. and Chen, Z. H. "Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961- 2000," *Geophys. Res. Lett.* vol. 32, pp. 1-5, 2005., permiten conocer el comportamiento de esta variable y por medio de análisis estadísticos, desarrollo de algoritmos inteligentes y otros medios, se puede predecir su estado; además, su conocimiento en un área específica es muy importante para determinar el potencial de uso de la energía solar para ser convertida, tanto en energía eléctrica como en energía térmica (Contreras et al., 2018).

Topografía, Geología y geotecnia

Los planos (o mapas) de la zona de interés dependen de esta etapa. Más y mejor información permite optimizar los diseños en etapas tempranas, teniendo como consecuencia una mayor economía en costos y plazos. Es deseable que la topografía de la zona de captación y zonas adyacentes sea lo suficientemente detallada para que permita estudiar diferentes alternativas para el desarrollo del proyecto y que puedan ser comparadas.

Finalmente los estudios Topográficos y Geológicos-geotécnicos que debe contener un proyecto de construcción de una microcentral hidroeléctrica en cada etapa de desarrollo son:

- Características geológicas generales y locales.
- Investigaciones del subsuelo mediante exploración geofísica y sondajes (pocos, solo en caso de ser estrictamente necesario).
- Reconocimientos preliminares de materiales de construcción: identificación de posibles zonas de empréstito (Llangato et al., 2023).

Estudio ambiental

Antes de la construcción de una microcentral hidroeléctrica, es esencial llevar a cabo un estudio ambiental detallado para evaluar los posibles impactos ambientales del proyecto y garantizar que se cumplan todas las regulaciones y requisitos legales, como:

Se evalúan los posibles impactos del proyecto en el entorno, como la alteración del ecosistema acuático y terrestre, la calidad del agua, la erosión del suelo y la biodiversidad.

Se identifican las áreas sensibles o protegidas y se toman medidas para minimizar los impactos negativos; se estudian los patrones de flujo de agua a lo largo del año para determinar la capacidad de generación de energía y los posibles impactos en el caudal ecológico.

Se identifican y analizan los riesgos asociados con el proyecto, como inundaciones, deslizamientos de tierra, cambios en el caudal y otros eventos climáticos extremos.

Se investigan y cumplen con todas las regulaciones ambientales y normativas aplicables a nivel municipal, departamental y nacional.

Se solicitan y obtienen los permisos necesarios , se consulta con partes interesadas, se establece un plan de monitoreo ambiental (Llangato et al., 2023).

Estudio social.

Es necesario analizar los posibles impactos sociales del proyecto, como el desplazamiento de comunidades locales, cambios en los medios de vida, impactos en la cultura local y cambios en las dinámicas sociales.

Tener en cuenta las comunidades locales, con sus necesidades, preocupaciones y diseñar programas de compensación o mitigación, evaluar los beneficios sociales del proyecto, como la generación de empleo en la vereda, el acceso a servicios públicos más económicos y otros impactos positivos en la calidad de vida de la comunidad (Llangato et al., 2023).

5.2 Central hidroeléctrica a filo de agua

Estas instalaciones, a diferencia de las de agua embalsada, no almacenan los aportes de un río, sino que, mediante una obra de toma, captan una porción del caudal del río, lo conducen hacia el sistema de turbinas y generadores y posteriormente lo devuelven al río mediante una obra de descarga. Estas centrales son utilizadas usualmente para producción de energía a pequeña escala. El proyecto en cuestión pretende usar este tipo de instalación dado que tiene menos impactos ambientales que un proyecto de agua embalsada y sus costos de realización mucho menores (Millán & Calderón, 2023) (Martínez, 2023).

5.2.1 Equipos electromecánicos

Los equipos electromecánicos utilizados en microcentrales hidroeléctricas son dispositivos que convierten la energía cinética del agua en energía eléctrica. Esto se logra a través de un proceso que involucra un generador eléctrico y una turbina hidráulica.

Turbina: es la encargada de transformar la energía cinética del agua en energía mecánica rotacional.

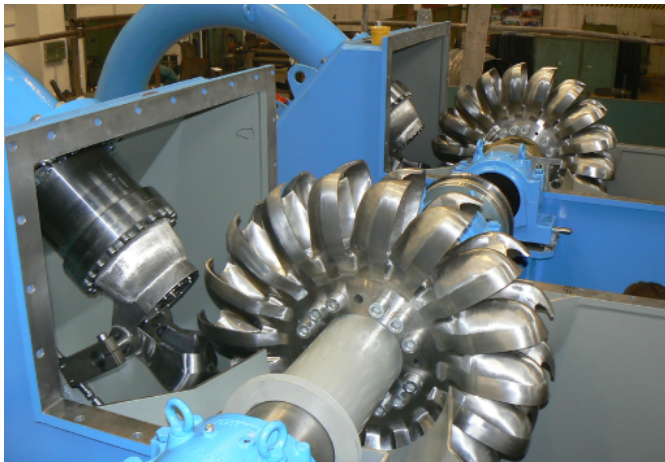
Generador: este elemento transforma la energía rotacional de la turbina en energía eléctrica a través de un eje compartido. Este elemento funciona a partir de electromagnetismo. El movimiento del eje es convertido en corriente eléctrica usando una o varias bobinas. En las centrales de pequeña escala, la corriente de salida de los generadores suele ser directa (DC) de valores entre 12 y 14 voltios.

Transformador o inversor: este se encarga de convertir la corriente directa producida por los generadores en corriente alterna de voltajes más altos, esto con el fin de poder conectarse a las líneas de transmisión (Martínez, 2023).

Turbinas

-Turbina Pelton: Consiste en una rueda (rodete o rotor) dotada de cucharas en su periferia, las cuales están especialmente realizadas para convertir la energía de un chorro de agua que incide sobre las cucharas. Están diseñadas para explotar grandes saltos hidráulicos de bajo caudal (Wikipedia, 2023).

Figura 1. Turbina Pelton.

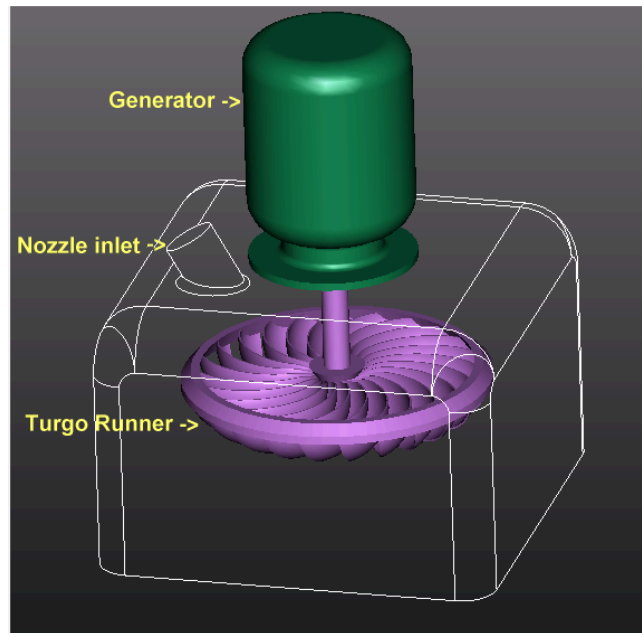


Fuente: (Pelton, 2023).

-Turbina tipo Turgo: La turbina Turgo es una turbina hidráulica de impulso diseñada para saltos de desnivel medio. Fue desarrollada por la compañía Gilkes en 1919 a partir de una modificación de la turbina Pelton; la Turgo tiene varias ventajas sobre la turbina Francis y la

Pelton en determinadas aplicaciones. Las Turgo operan en un campo de desniveles en el que se solapan las turbinas Francis y Pelton. Aunque existen muchas instalaciones grandes con turbinas Turgo, estas se utilizan más en instalaciones hidráulicas pequeñas en las que es importante el bajo costo (Wikipedia, 2023) .

Figura 2. Turbina Turgo.



Fuente: (Wikipedia, 2023)

-Turbina tipo propeller o hélice: Una turbina de tipo propeller o hélice en español, es un tipo de turbina que proporciona las rpm máximas del eje desde la altura de agua más baja. La hélice está completamente sumergida en agua (a diferencia de las turbinas pelton y turgo que funcionan en aire, impulsadas por un chorro de agua) (PowerSpout, 2023).

Figura 3. Turbina Propeller o Hélice.

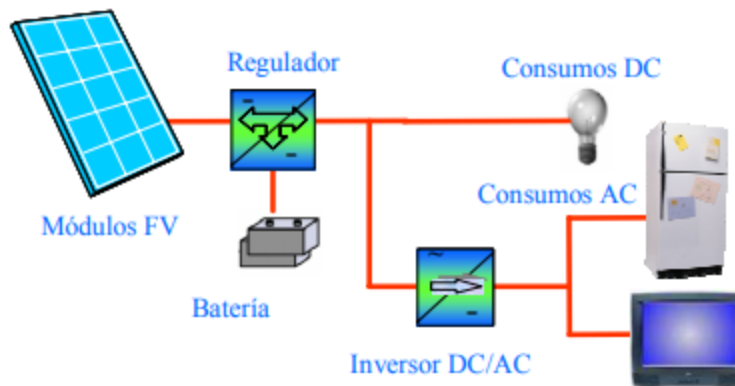


Fuente: (Hot Item, 2023)

5.3 Sistemas Fotovoltaicos

Un sistema fotovoltaico es un sistema eléctrico especial que produce energía a partir de una fuente renovable e inagotable: el sol (ENEL X, 2023).

Figura 4. Turbina Propeller o Hélice.



Fuente: (Abella, 2023)

5.3.1 Principales equipos

Paneles solares fotovoltaicos

Un panel solar fotovoltaico es un dispositivo que convierte la energía del sol en electricidad, sin combustible. La tecnología fotovoltaica explota el efecto fotoeléctrico, que crea una corriente eléctrica en un material tras la exposición a la irradiación(5 avances, 2020).

Figura 5. Paneles Fotovoltaicos.



Fuente: (Fotovoltaico, 2023).

Panel Monocristalino

El panel solar monocristalino, compuesto por células de un único cristal de silicio, tienen mayor eficiencia y rendimiento que el panel solar policristalino, lo que significa que generan más energía con la misma cantidad de luz solar. Además, el panel solar monocristalino tiende a ser más duradero que el policristalino y ofrece una mayor resistencia a la sombra y al viento. Esto significa que requieren menos mantenimiento a largo plazo y, un panel monocristalino, tiene menos probabilidades de degradarse con el paso del tiempo, entre sus principales diferencias con el panel policristalino. Con los nuevos desarrollos y la nueva tecnología, podemos encontrar paneles solares monocristalinos PERC (5 avances, 2020).

Panel Policristalino

El panel solar policristalino está formado por células con múltiples partículas de silicio cristalizadas. Las mayores diferencias y ventajas respecto al panel solar monocristalino es el precio. El panel solar monocristalino es más costoso que el panel solar policristalino. Por lo tanto, si el presupuesto es un factor decisivo a la hora de elegir entre un panel solar

monocristalino o policristalino, el panel policristalino es la opción más económica (5 avances, 2020).

Nuevas tecnologías

- **La tela de células solares:** Es una tela con energía fotovoltaica incorporada que genera electricidad cuando se expone a la luz. La idea de un textil portátil con energía solar proviene de Trisha Andrew, una química, y Marianne Fairbanks, una diseñadora con una pasión compartida por la energía solar. Sin embargo, la idea de una prenda que pueda alimentar su teléfono no es tan nueva. Las telas solares se han incorporado a las cubiertas de los estadios, toldos solares, cocheras e incluso arte portátil, pero el objetivo de Andrew y Fairbanks ha sido desarrollar un tipo de tela superior en densidad, transpirabilidad y calidad. Recientemente, Pvilion, una compañía solar con sede en Brooklyn, ha colaborado con Tommy Hilfiger para hacer chaquetas con energía solar. Entre los principales beneficios, hay una reducción significativa en el uso de electricidad y la superación del problema del agotamiento de las baterías (5 avances, 2020).

Figura 6. Tela de Células Solares.



Fuente: (Ropa, 2023).

- **Las barreras acústicas fotovoltaicas (PVNB):** Son sistemas de obstrucción contra el ruido con tecnología solar fotovoltaica integrada diseñada para producir energía renovable y reducir los niveles de ruido al mismo tiempo. La primera instalación de barreras acústicas fotovoltaicas tuvo lugar en Suiza en 1989 y desde entonces muchas otras han seguido (5 avances, 2020).

Figura 7. Barreras Acústicas Fotovoltaicas.



Fuente: (BIPV, 2023).

- **La tecnología BIPV:** Los recientes avances tecnológicos han hecho que los paneles fotovoltaicos se puedan incorporar en la construcción de edificios. La energía fotovoltaica puede integrarse en la arquitectura del edificio y reemplazar los elementos tradicionales con paneles solares cristalinos o de película delgada semitransparentes. Building Integrated Photovoltaics se refiere a la aplicación de la energía fotovoltaica en la que el sistema produce energía y asume el papel de un elemento de construcción. La tecnología BIPV se puede utilizar en las fachadas, en patios y terrazas y en las marquesinas del edificio y convertirse en una parte integral del mismo. El BIPV también puede ser estéticamente atractivo y utilizarse para camuflar exteriores de edificios poco atractivos. Según los analistas del mercado, una tasa de crecimiento anual estimada de 18.7% y un total de 5.4 GW se ha producido e instalado en todo el mundo entre 2013 y 2019 (5 avances, 2020).

Figura 8. Tecnología BIPV.



Fuente: (BIPV, 2023).

Reguladores

El regulador de carga solar es un pequeño componente que puede ir de forma independiente o bien integrado en el inversor. Se encarga de regular la cantidad de energía que las baterías almacenan, de esta forma protegen su vida útil (Autosolar, 2023).

Figura 9. Regulador Solar.



Fuente: (orsonz, 2021).

Inversores

Los inversores solares son uno de los elementos más importantes de la instalación solar con placas. Se encargan de transformar la corriente continua que genera la instalación solar en corriente alterna a 60Hz para nuestro caso. El inversor en un sistema de generación con panel solar es el encargado de convertir la corriente continua procedente de las placas fotovoltaicas o la batería en corriente alterna senoidal, hay dos clases muy importantes a tener presente (Autosolar, 2023).

Figura 10. Inversor para energía solar.



Fuente: (Autosolar, 2023)

Inversor On grid

El concepto on grid hace referencia al tipo de instalación que se encuentra conectado a la red de distribución, permitiendo que los clientes puedan generar y consumir energía solar, pero con el respaldo de la red eléctrica en casos de que su empresa o residencia consuma más energía de la generada por los paneles. Sin embargo, cuando ocurre el caso contrario, el sistema on grid permite inyectar los excedentes a la red eléctrica, la cual permite que los clientes reciban un pago por cada kWh tarifado en el medidor, ayudando a disminuir significativamente la cuenta de electricidad (Proyectos, 2021).

Inversor Off grid

El concepto off grid hace referencia al tipo de instalación que no requiere estar conectado a la red ya que cuenta con un conjunto de baterías capaz de almacenar toda la energía generada durante el día, y de esta forma, poder ser utilizada en cualquier momento, siendo un sistema

totalmente independiente y autónomo, utilizado comúnmente en áreas aisladas. Por esta misma razón es que suele ser más costoso que el sistema on grid (Proyectos, 2021).

Baterías

Las baterías son dispositivos capaces de almacenar la energía que proviene de las placas solares en forma de energía química y, posteriormente, usando procedimientos electroquímicos, producir energía eléctrica. En las baterías este ciclo puede repetirse un determinado número de veces, por ejemplo, las de descargas profundas lo pueden repetir muchas veces (Autosolar, 2023).

Figura 11. Baterías para energía solar.



Fuente: (Enercity, 2020).

Sistema de medida

Un contador bidireccional es un equipo capaz de registrar la energía importada y exportada de manera separada en un instante de tiempo. Es usado para sistemas de generación fotovoltaica, eólica o cualquier otra fuente de energía adicional.

En los momentos en los que la generación supere la demanda, el registro de kWh importados permanece inmóvil, mientras que el de energía exportada va sumando. Al entrar en vigor la resolución 030 de la CREG, los operadores de red deberán descontar el valor de energía exportada del de energía importada, reduciendo así la facturación de electricidad (Autosolar, 2023).

Figura 12. Medidor Bidireccional.



Fuente: (Medidor, 2023).

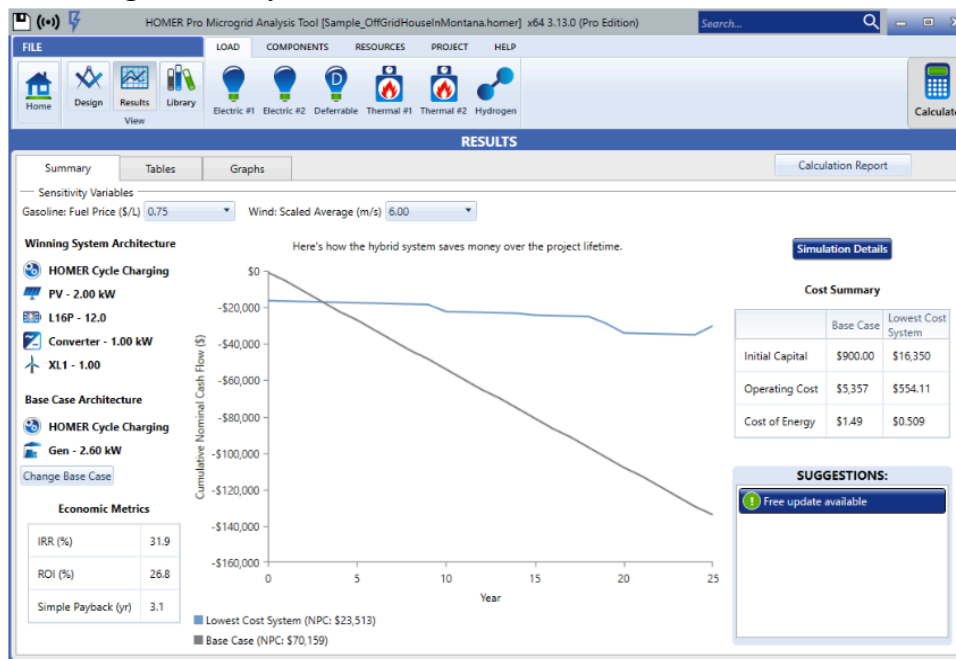
5.4 Software HOMER Pro

Basado en la confiable plataforma de optimización de energía híbrida HOMER de UL Solutions, HOMER Front modela el desempeño técnico y económico y el despacho de sistemas de almacenamiento de energía a escala de servicios públicos, ya sea de forma independiente o junto con la energía solar.

Obtiene información crítica y práctica sobre estrategias óptimas que maximizan los ingresos de los mercados comerciales de energía, contratos de capacidad o acuerdos de compra de energía. Al modelar aspectos clave de su diseño, puede determinar el sistema ganador.

La optimización de energías renovables, es esencial para una energía limpia y un futuro confiable. Pero el éxito económico requiere optimizar numerosas variables, como generación variable, mercados energéticos y acuerdos de compra de energía (HOMER Pro, 2023).

Figura 13. Software HOMER Pro.



Fuente: (HOMER Pro, 2023).

6 Estado del Arte

El desarrollo de sistemas híbridos de generación de energía, que combinan fuentes renovables como la solar y la hidráulica, ha demostrado ser una solución efectiva en aplicaciones agrícolas y rurales. Un estudio presenta un sistema híbrido de paneles solares y pico-hidráulica en una instalación de acuaponía doméstica, donde el agua utilizada para el riego hidropónico genera electricidad a través de un generador pico-hidráulico. Este sistema demostró ser capaz de satisfacer las necesidades energéticas básicas de una pequeña aplicación agrícola (Nugraha et al., 2023). Otro estudio en Colombia diseñó un sistema híbrido similar para fincas agroindustriales, mostrando que la combinación de energía solar e hidráulica puede resolver problemas de accesibilidad y calidad de la energía, con una viabilidad económica favorable y beneficios tributarios por el uso de energías renovables (Rincón S & Vera S, 2019). Además, la optimización de un sistema híbrido que combina una planta fotovoltaica flotante con una hidroeléctrica en India demostró ser más económicamente viable que el uso de solo una fuente de energía, destacando la importancia de la integración y el análisis de diferentes configuraciones tecnológicas para maximizar la eficiencia energética y económica (Patil et al., 2022).

La evaluación técnico-económica de sistemas de energía renovable es fundamental para determinar su viabilidad y optimización. Un estudio técnico-económico de sistemas híbridos de energía renovable conectados a la red, optimizados mediante HOMER Pro, destacó la importancia de analizar el impacto de los precios de electricidad y la hibridación de fuentes renovables, demostrando que un sistema híbrido solar-eólico puede maximizar la rentabilidad y minimizar las emisiones de carbono (Halmous et al., 2024). Investigaciones adicionales en Corea del Sur y Bangladesh también evaluaron la viabilidad de reemplazar generadores diésel con sistemas híbridos de energía renovable en islas remotas, demostrando la necesidad de una evaluación económica rigurosa antes de la implementación para asegurar la rentabilidad y sostenibilidad de estos proyectos (Jin et al., 2018),(Md. Islam et al., 2022). En Ecuador, un diseño de microrred utilizando energía solar fotovoltaica mostró ser la solución más económica y sostenible para proporcionar energía a instalaciones educativas, subrayando la importancia de la simulación y optimización para encontrar configuraciones tecnológicas viables (González et al.,

2022). Finalmente, el diseño de una pico-central hidroeléctrica en Ecuador mostró cómo los recursos hídricos renovables pueden mejorar la calidad de vida en zonas rurales aisladas, proporcionando una solución autosustentable de generación eléctrica (Iñiguez et al., 2022).

La optimización de microrredes es clave para la implementación eficiente de sistemas de energía renovable. En Marruecos, se desarrolló una microrred optimizada para una comunidad rural utilizando HOMER Pro, logrando reducir la dependencia de la red eléctrica y aumentar la fracción de energía renovable (Boqtob et al., 2019). Además, una metodología novedosa integrando un sistema de gestión de energía (EMS) con HOMER Pro permitió optimizar la operación de microrredes, mostrando ventajas económicas al hacer un uso más eficiente del almacenamiento en baterías (Santos et al., 2021). En otro estudio, se desarrolló un modelo de optimización de microrredes que integra transacciones en los mercados eléctrico, de carbono y de certificados verdes, logrando reducir los costos operativos y aumentar el consumo de energía renovable (Bian et al., 2023). En Ecuador y Bangladesh, se implementaron microrredes que maximizan la generación de energía eléctrica a partir de recursos renovables, demostrando la efectividad de la simulación y optimización en la planificación de microrredes (Quinteros Flores et al., 2023),(Md. K. Islam et al., 2021).

Los proyectos de energía renovable enfrentan desafíos socioeconómicos significativos, especialmente en regiones donde la participación ciudadana y las normativas internacionales complican la implementación. Un análisis de proyectos hidroeléctricos en América Latina resaltó cómo la creciente participación ciudadana y las demandas de comunidades indígenas han dificultado estos desarrollos, aunque también mostró ejemplos exitosos donde la interacción efectiva con las comunidades mejoró los resultados (Varas et al., 2013). En Japón, el análisis de una pequeña central hidroeléctrica integrada en un sistema de distribución de agua reveló que, aunque existen desafíos como la dependencia de esquemas tarifarios, los beneficios socioeconómicos como la reducción de emisiones y el desarrollo comunitario son considerables ((Ahirwar et al., 2021),(Mitsumori, 2022)). Además, un estudio en Polonia sobre Comunidades de Energía Renovable (REC) identificó barreras e incentivos específicos para diferentes configuraciones de REC, destacando la importancia de adaptar los proyectos a las condiciones

locales para asegurar su éxito (Neska et al., 2024). Finalmente, un análisis global del impacto de las energías renovables resaltó su papel en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la generación de empleo y el desarrollo tecnológico (Ayadi et al., 2020).

Las innovaciones en sistemas de energía inteligente y la gestión de recursos energéticos están transformando la industria eléctrica. Un nuevo sistema de energía inteligente con emisiones netas de carbono cero (NZIES) propone un enfoque holístico que integra múltiples fuentes de energía con la gestión de carbono e información, ofreciendo una visión integrada para la transición a sistemas energéticos limpios e inteligentes (Hu et al., 2021). En Corea del Sur, la plataforma KT-MEG combina tecnologías de IoT y gestión inteligente de energía para crear una red de energía a microescala, optimizando la eficiencia energética mediante el análisis de patrones de consumo y producción (Jung et al., 2018). Además, un estudio en China sobre la planificación de la capacidad para la integración de energía renovable en redes eléctricas mostró la importancia de considerar la estabilidad del sistema al calcular la capacidad máxima de integración segura de energía renovable, destacando la necesidad de enfoques específicos para redes eléctricas débiles en áreas remotas (Li et al., 2020). Finalmente, en Vietnam, se desarrolló un modelo de simulación para optimizar el uso de energía renovable en granjas agrícolas, mejorando la autonomía energética y reduciendo costos operativos (Thi Thu et al., 2023).

La viabilidad técnica y económica de sistemas de energía renovable es crucial para su implementación exitosa en diferentes regiones. Un estudio de prefactibilidad para un sistema fotovoltaico aislado en Guatemala evaluó tanto variables cuantitativas como cualitativas, demostrando la importancia de un enfoque mixto para asegurar la viabilidad técnica, económica y ambiental de estos proyectos (Culpatán, s. f., 2019). En Rusia, se evaluó el potencial de diversas fuentes de energía renovable en la región de Krasnodar, destacando las condiciones favorables para el desarrollo de energía solar y eólica y proponiendo un enfoque integrado para aumentar la confiabilidad del suministro (Grigorash et al., 2019). Por último, un análisis de la viabilidad técnica de Australia para alcanzar su objetivo de generar el 20% de su electricidad a partir de fuentes renovables subrayó los avances tecnológicos y las políticas regionales que han

facilitado este progreso, proporcionando una evaluación integral del desarrollo de energías renovables en el país (Jacob & Liyanapathirana, 2018).

7 Descripción Técnica del proyecto

Para el estudio técnico económico se toma una truchera ubicada en el municipio de Urrao Antioquia la cual tiene un consumo energético aproximado de 1.000 kWh/mes, la idea es aprovechar los recursos disponibles para la autogeneración de energía eléctrica.

En principio se visita la truchera con el fin de analizar las fuentes potenciales que se tienen para la autogeneración, al llegar al sitio se observan dos grandes afluentes de agua (quebrada Montenegro y la Santa Isabel), de los cuales la truchera hace una captación a través de bocatomas para el desarrollo de su cultivo, se plantea aprovechar el recurso y las obras de captación ya construidas para hacer un prediseño de una pequeña central hidroeléctrica a filo de agua, como se observa en la Figura 16. Referencia de puntos para prediseño hidráulico.

También se identifica que el lugar tiene grandes zonas despobladas, en las cuales el sol incide gran parte del día, no tienen montañas cercanas, ni árboles altos, los estanques poseen unas sombras artificiales para proteger los peces del sol (polisombras), por lo cual se puede hacer uso de estos espacios para el montaje de paneles solares.

El propietario del lugar suministra la cuenta de servicios públicos con los datos del consumo trimestral del predio, donde se evidencia un consumo mensual aproximado de 1.000 kWh/mes, además de datos como el número de transformador y nodo, adicionalmente se hace una solicitud formal a la entidad estatal Corpouraba encargada de los afluentes hídricos, solicitando los datos existentes de las quebradas Santa Isabel y Montenegro de los últimos cinco años para su posterior análisis. Además en la visita, se tomaron las coordenadas del sitio para analizar las condiciones de irradiación solar en una plataforma tecnológica.

Los datos para el diseño de generación hidráulica se tomarán de los datos suministrados por Corpourabá de los 2 afluentes hídricos, en caso de que no se tenga disponibilidad de estos datos, se está realizando un método de medición de caudal volumétrico, tomados en campo cada mes desde la fecha 08/10/2023, adicionalmente en esta visita medimos la diferencia de altura para las 2 bocatomas, con respecto al posible punto de generación hidroeléctrica.

Los datos de radiación solar para el diseño del sistema de generación fotovoltaica se consultan en ayudas tecnológicas como Atlas de Radiación Solar de Colombia, suministrado por el IDEAM o de la página oficial de la NASA.

Basados en los datos recolectados, se procederá a realizar los prediseños de la PCH y de la planta solar, incluyendo las obras civiles necesarias, equipos para cada sistema y costos. A través del programa HOMER Pro se ingresan los datos arrojados por la investigación y los diseños, como, tasa de retorno, valor presente neto, costo del kWh, entre otros, y el programa calcula que es lo viable de los prediseños y sugiere el sistema de autogeneración adecuado para la solución de de autogeneración en la truchera (HOMER Pro, 2023).

8 Metodología

A continuación se presenta la metodología propuesta y el procedimiento para lograr los objetivos asociada al estudio técnico económico de autogeneración en una truchera del municipio de Urrao, del departamento de Antioquia.

8.1 Tipo de proyecto

El estudio técnico económico de la viabilidad de autogeneración busca mediante una metodología aplicada dar la solución adecuada para abastecer las necesidades energéticas en la truchera y crear autonomía, a través de una investigación correlacional entre generación hidroeléctrica, fotovoltaica y el consumo al operador de red, con una forma cuantitativa para determinar cuál se sugiere implementar o dejar.

8.2 Método

Para realizar el estudio técnico económico de viabilidad de autogeneración en la truchera se necesita un método inductivo que permita la obtención de conclusiones a partir de la toma de datos, los prediseños y la comparación con el software HOMER Pro (HOMER Pro, 2023).

8.3 Instrumentos de recolección de información

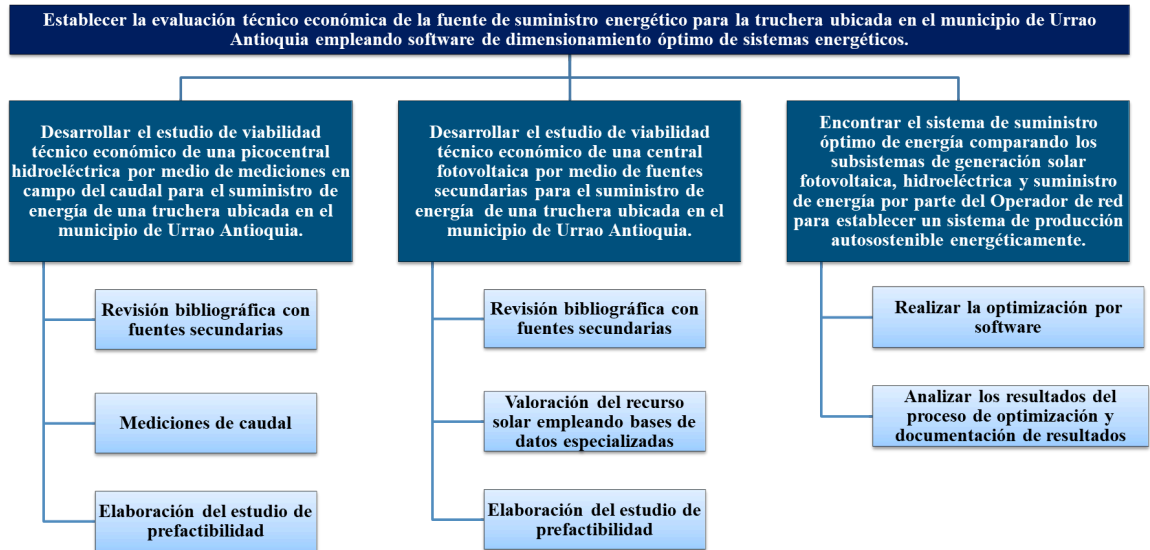
Los instrumentos para recolección de información que se aplicaran para el desarrollo del proyecto de grado serán fuentes primarias que contienen información original como libros, revistas científicas, documentos oficiales o informes técnicos y de investigación de instituciones públicas o privadas, patentes, normas técnicas, apuntes de investigación y fuentes secundarias que compilan, interpretan y analizan las fuentes primarias como enciclopedias, diccionarios, antologías, síntesis, revistas de resúmenes, periódicos, directorios, libros o artículos de investigaciones.

8.4 Desarrollo metodológico

Para lograr la evaluación técnico económica de la fuente de suministro energético para la truchera, empleando software de dimensionamiento óptimo de sistemas energéticos, se identificó un conjunto mixto de metodologías con el cual se alcanza cada objetivo específico, a su vez, se

identificaron las actividades principales, las tareas a realizar en cada actividad, el resultado y el medio de verificación de la misma. A continuación, se presenta este desarrollo para cada objetivo.

Figura 14. Actividades asociadas a la metodología requerida para el desarrollo del proyecto.



Fuente: Elaboración propia

9 Resultados del proyecto

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis técnico-económico de las diferentes alternativas de suministro energético para la truchera ubicada en el municipio de Urrao, Antioquia. Se detallan los estudios de viabilidad tanto de una picocentral hidroeléctrica, basados en mediciones de caudal para los 2 afluentes hídricos que se tienen (Montenegro y Santa Isabel), como de una central fotovoltaica, fundamentada en fuentes secundarias y herramientas de software especializado. Finalmente, se realiza una comparación de ambas alternativas con el suministro tradicional de la red eléctrica para determinar el sistema óptimo, priorizando la eficiencia y la autosostenibilidad energética del proyecto.

9.1 Prediseño y dimensionamiento para el Estudio de Viabilidad Técnico-Económica de la Picocentral Hidroeléctrica

Para evaluar la viabilidad técnico-económica de la picocentral hidroeléctrica se viaja hasta la truchera ubicada en el municipio de Urrao del departamento de Antioquia, para recolectar los datos del consumo energético de las instalaciones y de los recursos a utilizar, como el caudal de agua y la altura de la cabeza de fuerza, a su vez observar las bocatomas ya construidas y su funcionamiento.

Figura 15. Imagen de la Truchera Urrao Antioquia.



Fuente. Propia

- **Medición de cabeza de fuerza.**

El proyecto cuenta con diferentes obras de captación y con el fin de identificar cuál de éstas es la más adecuada para el proyecto, se realizan las mediciones de la altura de la cabeza de fuerza. Se utiliza un altímetro para medir la altura sobre el nivel del mar (m s. n. m) de cada una de las bocatomas y del tanque desarenador, con respecto al sitio tentativo donde se piensa ubicar la turbina, se calcula la diferencia de altura entre estas, para determinar la cabeza de fuerza de cada una, así:

Figura 16. Referencia de puntos para prediseño hidráulico.



Fuente: Propia.

Tabla 1. Mediciones de altura de la cabeza de fuerza.

| Sitio | Altura de las obras de captación (m.s.n.m) | Altura m.s.n.m de la turbina | Cabeza de fuerza (m) |
|-----------------------|--|------------------------------|----------------------|
| Bocatoma Santa Isabel | 2386 | 2344 | 42 |
| Bocatoma Montenegro | 2367 | 2344 | 21 |
| Tanque de carga | 2351 | 2344 | 7 |

Fuente. Propia.

- **Mediciones de velocidad y caudal.**

En primera instancia, fué necesario evaluar las bocatomas construidas, ya que son asimétricas y muy rudimentarias, se toman medidas del área transversal para determinar el volumen de agua captado en cada una, luego se realizan pruebas de la velocidad del fluido, mediante el método de las aleluyas, con estos datos se calcula el caudal disponible mediante Bernoulli.

Figura 16. Imagen de verificación de bocatomas y medidas de estas.



Fuente: Propia

Después de realizar las mediciones de la velocidad del agua en los canales mediante el método de las alerías, el área transversal y con estos datos calcular el caudal de cada una de las captaciones en las bocatomas Santa Isabel y Montenegro, se llegó a una conclusión, lo rudimentario de los canales y lo asimétricos que son no permiten calcular con precisión la velocidad, el caudal y las pérdidas que se presentan al momento de la generación, construir estos nuevamente de forma más estéticos y simétricos representa un sobrecosto para el proyecto, por tal motivo, se determina, la necesidad de construir un pequeño tanque de carga, continuo al tanque desarenador que ya existe en la salida de la bocatoma de la quebrada Montenegro, de esta forma se puede instalar una tubería del tanque de carga directo al sitio de producción, lo cual permite conocer el diámetro del ducto y poder calcular las pérdidas con exactitud.

Figura 17. Imagen del tanque desarenador y sitio de construcción del tanque de carga



Fuente. Propia.

Se aplica Bernoulli para conocer velocidad y caudal a 2 diferentes alturas, donde se identifica la factibilidad para la obra civil requerida en el momento de construir el tanque de carga y del sitio de producción tentativo, debido a que, según el desarrollo de la construcción y de la turbina adquirida puede variar la altura entre 6,2 m y 7 m, entre estas dos construcciones; además se escoge una tubería de 2-1/2 pulgadas o 65 mm según turbina a utilizar .

Según la ecuación de Bernoulli (LAyF & Bracco, s. f.), tenemos:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (1)$$

Para este caso:

$$P_1 = P_2 = atm$$

$$V_1 = 0$$

$$z_2 = 0$$

Por lo que queda:

$$V_2 = \sqrt{2gz_1} \quad (2)$$

Para altura de 6,2 mts, tenemos:

$$V_2 = 11,03 \frac{m}{s}$$

Y para altura de 7 mts, tenemos:

$$V_2 = 11,72 \frac{m}{s}$$

Luego:

$$D = 2-1/2'' = 65 \text{ mm} = 0,065 \text{ m}$$

$$A = 0,00332 \text{ m}^2$$

Y tenemos que el caudal es:

$$Q = VA \quad (3)$$

Para 6,2 mts, el caudal es:

$$Q = 0,037 \frac{m^3}{s}$$

Y para 7 mts, el caudal es:

$$Q = 0,039 \frac{m^3}{s}$$

- **Medición del consumo energético de la truchera.**

Se lleva hasta la truchera un analizador de redes marca Fluke de referencia 434, el día 24 de enero del 2024, se programa para adquirir los datos de consumo en vatios(W) durante 24 horas, de hora en hora y se procede a Conectarse.

Figura 18. Medición con analizador de redes.



Fuente. Propia.

Después de pasadas las 24 horas, se desmonta el equipo, se descargan los datos, se filtran y se dejan listos para utilizarse en el modelamiento de la carga y facilitar los cálculos tanto de la generación hidráulica, como de la generación solar .

Tabla 2. Consumo energético real de la truchera.

| Hora | W Max | W min | W prom | W prom (kW) |
|-------------|--------------|--------------|---------------|--------------------|
| 1 | 850 | 810 | 830 | 0,83 |
| 2 | 1.160 | 1.138 | 1.149 | 1,149 |
| 3 | 1.063 | 1.036 | 1.049,5 | 1,0495 |
| 4 | 1.122 | 1.084 | 1.103 | 1,103 |
| 5 | 944 | 922 | 933 | 0,933 |
| 6 | 967 | 784 | 875,5 | 0,8755 |
| 7 | 970 | 658 | 814 | 0,814 |
| 8 | 1.036 | 961 | 998,5 | 0,9985 |

| | | | | |
|--------------|--------|--------|---------|--------|
| 9 | 1.005 | 970 | 987,5 | 0,9875 |
| 10 | 1.087 | 935 | 1.011 | 1,011 |
| 11 | 1.037 | 861 | 949 | 0,949 |
| 12 | 987 | 787 | 887 | 0,887 |
| 13 | 1.222 | 1.130 | 1.176 | 1,176 |
| 14 | 1.630 | 1.112 | 1.371 | 1,371 |
| 15 | 993 | 954 | 973,5 | 0,9735 |
| 16 | 1.099 | 972 | 1.035,5 | 1,0355 |
| 17 | 1.307 | 1.202 | 1.254,5 | 1,2545 |
| 18 | 1.305 | 1.193 | 1.249 | 1,249 |
| 19 | 1.259 | 1.133 | 1.196 | 1,196 |
| 20 | 947 | 892 | 919,5 | 0,9195 |
| 21 | 1.243 | 1.182 | 1.212,5 | 1,2125 |
| 22 | 1.151 | 1.122 | 1.136,5 | 1,1365 |
| 23 | 1.124 | 1.091 | 1.107,5 | 1,1075 |
| 24 | 1.078 | 1.053 | 1.065,5 | 1,0655 |
| Total | 26.586 | 23.982 | 25.284 | 25,284 |

Fuente. Propia.

- **Datos de la cuenta de servicios y tasa representativa del mercado.**

Para realizar los prediseños es necesario tener como referencia para los cálculos los datos obtenidos de la cuenta de servicios suministrados por el dueño de la truchera, el valor de la tasa de cambio del peso colombiano con respecto al dólar, esto último, debido a que, más adelante en la evaluación técnico económica mediante la herramienta HOMER Pro los valores se van a ingresar en esta moneda, con la tasa representativa del mercado también se utilizará un promedio de la inflación de los últimos 10 años (*DANE - INDICADORES ECONÓMICOS*, s. f.).

Nota: El valor del dólar para Colombia se tomó el 2 de septiembre del 2024.

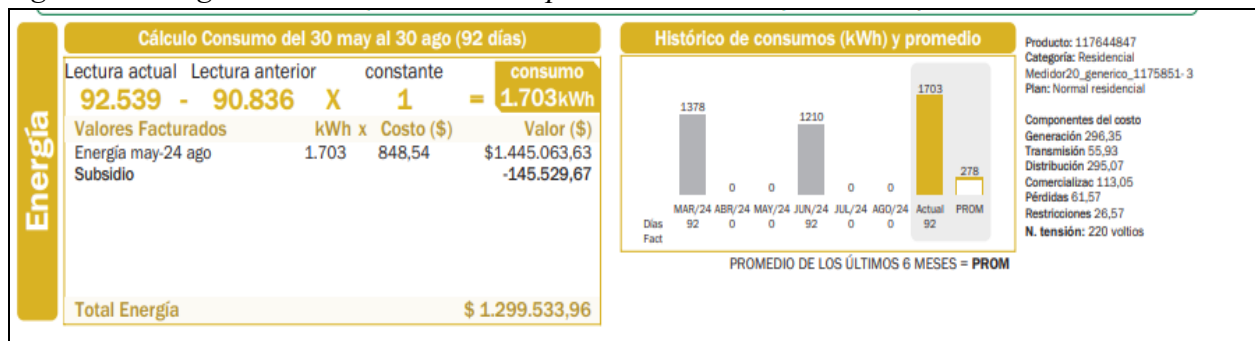
Tabla 3. Servicios públicos y tasa representativa del mercado.

| | |
|---|---------------|
| Promedio consumo en kWh/mes | 911,33 |
| Costo por kWh | COP - 848,54 |
| Valor de venta de kWh por generación | COP - 296,35 |
| Valor del dólar | COP - 4179.59 |
| Promedio inflación (%) | 5.7 |

Fuente: Propia

Este es el costo actual por kWh del suministro energético de la truchera, directamente de la factura de servicio público.

Figura 19. Imagen del recibo de servicios públicos de la truchera.



Fuente. Propietario de la truchera..

En el último año se han presentado afectaciones en la producción de la truchera debido al fenómeno del niño, a pesar de que los caudales de agua se mantienen, la temperatura y el oxígeno del agua han cambiado, por lo tanto, es necesario introducir menos peces en los estanques, lo cual conlleva a una baja producción, esta condición proporcional al consumo de energía.

Cuando el proyecto se comenzó, los consumos de energía eran más altos a los actuales, por tal motivo, los cálculos para la parte hidroeléctrica y fotovoltaica se va a tomar con los consumos más altos que se tenían anteriormente y se va a tener en cuenta el precio actual del

consumo de energía al operador, esta medida se toma con la intención de satisfacer el consumo energético de la truchera cuando esta vuelva a plenitud de su producción.

Tabla 4. Consumo kWh/mes de la truchera.

| Trimestre año 2023 | Consumo energético (kWh) |
|--------------------|--------------------------|
| Enero - Marzo | 2.337 |
| Abril - Junio | 2.856 |
| Julio - Septiembre | 3.008 |
| Promedio mensual | 911,33 |

Fuente. Propia.

Durante las 24 horas del día, la turbina estará generando 1,6 kWh y siempre se le estará entregando los excedentes a la red de EPM, más adelante se hablará más a detalle de este proceso.

- **Presupuesto del prediseño de generación hidráulica.**

Para realizar el prediseño de la generación hidráulica se toma como base el consumo evidenciado en la truchera mediante los datos recolectados por el analizador de redes y se realiza con la ayuda de la calculadora con la que cuenta la página la empresa Power Spout (*PowerSpout - Home Scale Micro Hydro, 2024*) para la selección de sus productos, esta ayuda a concluir que tipo de turbina utilizar, con qué cabeza de fuerza final y que diámetro de tubería se requiere para suplir la necesidad, se hace explicación de todos los ítems cotizados para el presupuesto:

- Turbina PowerSpout TRG - Hydro Turbine, la cual según la calculadora nos podrá generar 1295 W con cabeza de fuerza de 7 metros y una tubería de 2.½”.
- Gastos en cambios de moneda e importación de turbina.
- Inversor Phoenix 48/1200 230/120VE Direct..
- Elementos de protección. DPS, totalizador, breakers, gabinetes.

- Mano de obra calificada. Se presupuesta aproximadamente 20 días de trabajo de un maestro de obra, un técnico electricista y un ayudante.
- Interconexión y todo lo que tiene que ver con conductores, sus conexiones y empalmes. Además, mejora del sistema de puesta a tierra.
- Obra Civil y realización del tanque de carga a 7 mts del punto tentativo de generación, tubería bajante y punto de generación.

En la tabla siguiente, se presentan los materiales, la cantidad, la columna (Valor) contiene el precio de los elementos y la mano de obra en el mercado, en la columna (Valor Total) se tiene el valor real más una rentabilidad del 30% para darle a la evaluación técnico económica una apreciación más cercana a la realidad de una instalación por parte de una empresa de esta área.

Tabla 5. Costos asociados a la generación hidroeléctrica.

| Cantidad | Descripción | V. unitario (COP) | V. Total (COP) | V. Total (US) |
|-----------------------------|--|--------------------------|-----------------------|----------------------|
| 1 | Generador PS TRG | \$ 12.747.587 | \$12.747.587 | \$3.050 |
| 1 | Flete de generador | \$ 2.000.000 | \$ 2.000.000 | \$ 478 |
| 1 | Inversor Phoenix 48/1200 230/120VE Direct. | \$ 1.763.893 | \$ 1.763.893 | \$ 422 |
| 1 | Protecciones | \$ 5.000.000 | \$ 5.000.000 | \$ 1.196 |
| 1 | Mano de obra calificada y no calificada | \$ 6.000.000 | \$ 6.000.000 | \$ 1.436 |
| 1 | Interconexión | \$ 8.000.000 | \$ 8.000.000 | \$ 1.914 |
| 1 | Obra Civil | \$ 15.000.000 | \$ 15.000.000 | \$ 3.589 |
| Total Estimado del Proyecto | | | \$ 66.696.006 | \$ 15.958 |

Fuente. Propia.

La operación y mantenimiento del sistema de generación hidroeléctrica se estima para la anualidad, al tener en cuenta, la limpieza del tanque desarenador todos los días durante el tiempo de lluvias y una periodicidad semanal durante el tiempo de verano de acuerdo con una

inspección visual diaria, por parte del mayordomo de la truchera, una revisión técnica a la turbina, al inversor y a las conexiones por parte de un técnico electricista cada seis meses, con un estimado total para este rubro de US \$ 100,49/año.

- **Dimensionamiento en HOMER Pro sistema hidráulico**

Para comenzar con el dimensionamiento de la parte hidráulica no se encuentra una turbina igual en HOMER Pro a la que se escoge para el prediseño, por lo que se debe modificar en la librería del programa una turbina que tenga unas características parecidas y se modifican sus parámetros hasta que tenga una potencia de generación similar a la simulada por la calculadora de PowerSpout. Para el optimizador el precio que pide es tener en cuenta el valor total del proyecto, incluyendo el inversor, ya que, la turbina que se escogió genera 48 VDC, al igual que todas las instalaciones necesarias para su puesta en marcha. Para el valor de recambio se ingresa el valor de turbina y del inversor, se estipula que la vida útil de cada uno (turbina e inversor) es de 15 años.

A continuación, se presenta la tabla resumen de los datos hidráulicos del proyecto.

Tabla 6. Resumen de los datos para la generación hidráulica.

| Descripción | Cantidad |
|--|-----------------|
| Capacidad de generación de la turbina (kW) | 1.6 |
| Costo del proyecto (US \$) | 15.958 |
| Costo de reemplazo (US \$) | 4.336 |
| Operación y mantenimiento anual (US \$) | 100,49 |
| Vida útil (años) | 15 |
| Cabeza de fuerza (m) | 7 |
| Caudal (L/s) | 39 |
| Caudal mínimo (L/s) | 10 |
| Caudal máximo (L/s) | 40 |
| Pérdida de carga en la tubería (%) | 5 |

Fuente. Propia.

El dimensionamiento de la parte hidráulica queda así en HOMER Pro.

Figura 20. Resumen para turbina "Hydro" en HOMER Pro

The screenshot displays the configuration window for a hydro turbine in HOMER Pro. The window is titled "HYDRO" and shows the following details:

- Name:** 1.6kW Generic
- Abbreviation:** Hyd1
- Buttons:** Remove, Copy To Library
- Economics:**
 - Capital Cost (\$): 15,958.00
 - Replacement Cost (\$): 4,336.00
 - O&M Cost (\$/yr): 100.49
 - Lifetime (years): 15.00
- Turbine:**
 - Available head (m): 7.00
 - Design flow rate (L/s): 39.00
 - Minimum flow ratio (%): 10.00
 - Maximum flow ratio (%): 40.00
 - Efficiency (%): 70.00
 - Nominal Capacity: 1.875 kW
- Electrical Bus:**
 - AC
 - DC
- Intake Pipe:**
 - Pipe head loss (%): 5.00
- Systems to consider:**
 - Simulate systems with and without the hydro turbine.
 - Include the hydro turbine in all simulated systems.

Fuente: HOMER Pro.

Se pueden apreciar los valores ingresados para el dimensionamiento en el optimizador HOMER Pro, este programa de entrada dice que con las condiciones de cabeza de fuerza y de cauda que se tiene se podría generar 1,875kW, que es ya es algo prometedor para la viabilidad del proyecto.

Además se ingresa en el software que realice análisis con y sin la turbina hidráulica, para analizar la viabilidad técnico económica.

9.2 Prediseño y dimensionamiento para el Estudio de Viabilidad Técnico-Económica de la generación Fotovoltaica

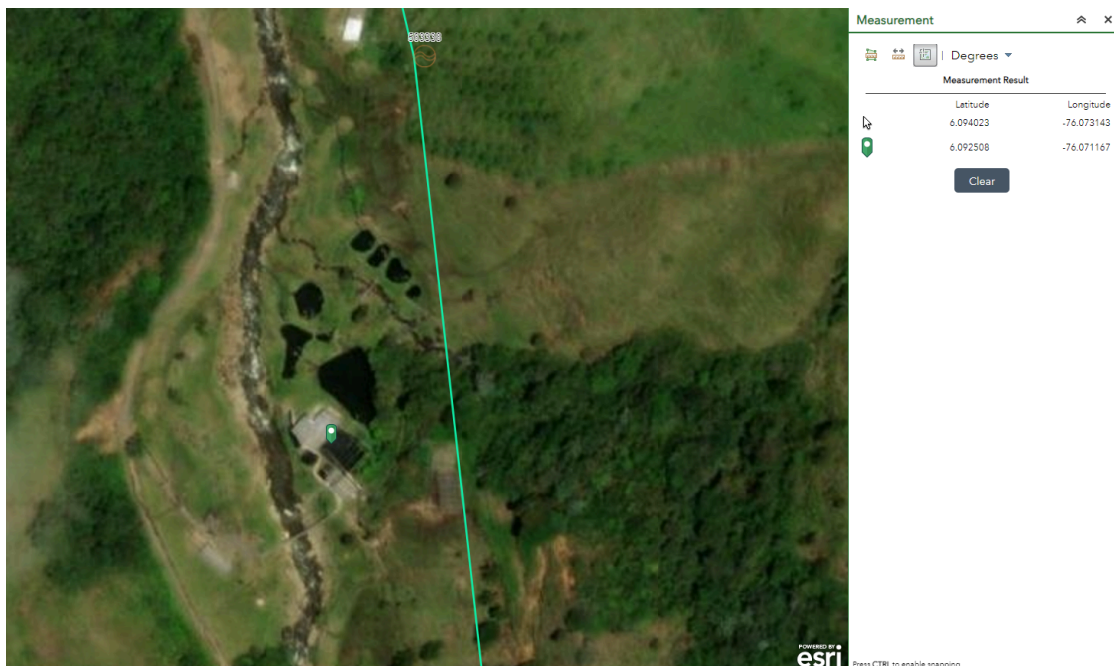
Después de realizar varias visitas a la truchera se logran identificar los recursos existentes en el lugar para la generación fotovoltaica y se irán describiendo uno a uno a continuación.

Ubicación geográfica exacta.

Se toman las coordenadas geográficas mediante la herramienta que brinda la empresa que presta el servicio eléctrico en la truchera, llamada Geoportal EPM (*Redes Energía*, 2024), se ingresa el número del transformador y el resto se hace por ubicación manual; es una herramienta valiosa y precisa debido a que se actualiza día a día, para brindar seguridad, los datos arrojados son estos.

Ubicación geográfica de la truchera: Longitud -76.071167° , Latitude 6.094023

Figura 21. Imagen de Geolocalización de la truchera.



Fuente. Geoportal EPM.

Determinar sitio tentativo de ubicación de los paneles solares.

Para determinar la ubicación correcta de los paneles solares en la truchera se tiene en cuenta la inclinación que hay que darle a los paneles para que apunten al sur y la sombra que genera la estructura de la casa con respecto a la rotación del sol, después de contemplar las afectaciones que se puedan presentar con las especificaciones anteriores, se determina que el sitio tentativo es encima de los tanques que están ubicados en la parte de atrás de la casa, debido a que se podría dar doble aprovechamiento del espacio de la parte alta de los tanques para la ubicación de los paneles y a su vez generar sombra necesaria para el cultivo de los peces.

Figura 22. Imagen. Sitio tentativo para ubicar los paneles solares.



Fuente. Propia.

Datos de radiación solar.

El cálculo de la radiación solar en la ubicación donde se van a instalar los paneles solares es parte vital para el proceso de diseño y cálculos de los equipos que se requieran, por tal motivo es necesario, de ser posible, utilizar una estación meteorológica cercana, de no ser posible, tomar en cuenta medición de varios sistemas meteorológicos que se puedan tener a la mano, para este caso se tuvieron en cuenta los datos extraídos de la página oficial de la NASA para el año 2022

(NASA, 2022), para este mismo periodo de tiempo los datos extraídos de la página de cálculos para sistemas fotovoltaicos PVGIS (*Solar Energy Calculator and Mapping Tool - PVGIS*, 2024), a su vez los datos radiación solar del año 2023 de la página de atlas solar mundial, un sistema especializado en cálculo de radiación solar(*Global Solar Atlas*, 2024).

Tabla 7. Radiación solar.

| Mes del año | Radiación kWh/m ² /día | | |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------|------------|
| | NASA (2022) | PVGIS (2022) | GSA (2023) |
| Enero | 3,78 | 4,38 | 3.5 |
| Febrero | 3,91 | 4,9 | 2.98 |
| Marzo | 4,19 | 4,14 | 2.59 |
| Abril | 4,21 | 4,84 | 2.52 |
| Mayo | 4,12 | 4,94 | 3.2 |
| Junio | 4,23 | 4,03 | 3,87 |
| Julio | 4,38 | 4,39 | 4,27 |
| Agosto | 4,49 | 4,4 | 3,96 |
| Septiembre | 4,63 | 4,28 | 3,33 |
| Octubre | 4,33 | 4,02 | 2,8 |
| Noviembre | 4,05 | 4,76 | 2,74 |
| Diciembre | 4,83 | 4,23 | 3,1 |
| Promedio anual | 4,18 | 4,11 | 3,24 |
| Mes más bajo | 3,78 | 4,02 | 2,52 |

Fuente. Propia.

Para este caso se va a trabajar con los datos de la NASA, debido a que el optimizador los puede descargar automáticamente de la página y los cálculos se van hacer con el mes más bajo de radiación solar.

Disponibilidad del operador de red para inyectar excedentes.

Cuando se mira la viabilidad de un proyecto de generación fotovoltaica con posible inyección de excedentes energéticos a la red, debido a que, no se pretende instalar baterías, es parte primordial del proceso revisar la disponibilidad de capacidad para la inyección en el transformador al cual está conectada la carga, en este caso el operador de red EPM tiene un portal que permite visualizar la disponibilidad en cada transformador de su red, se saca el número de transformador de la cuenta de servicios públicos, se ingresa al Geoportal EPM y se suministran los datos, así (SIG CREG030 - ETER, 2024).

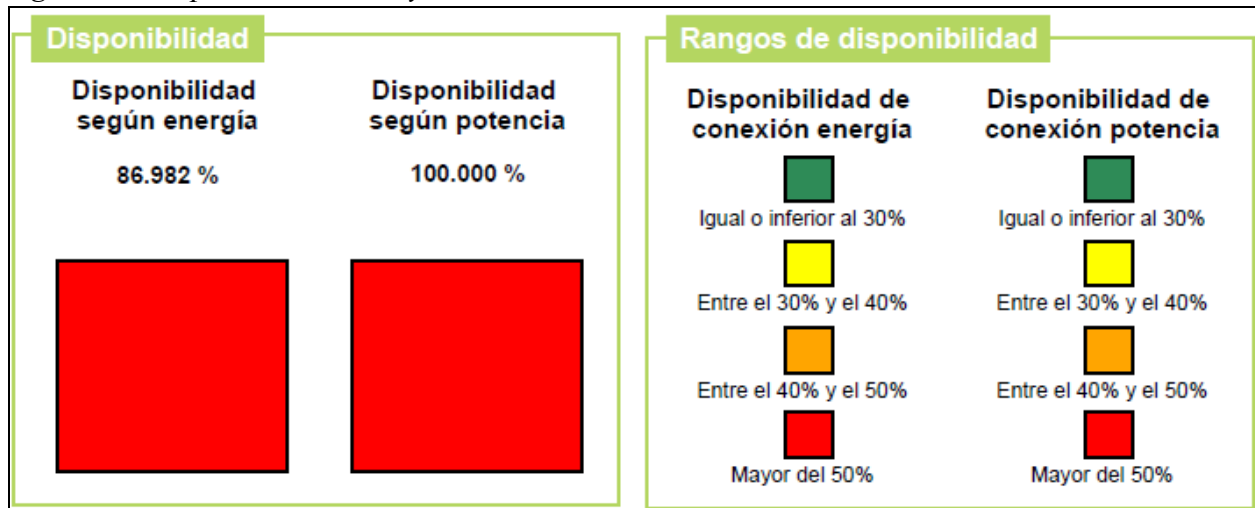
Figura 23. Suministro de datos a Geoportal EPM.

| Datos ingresados | | Información de punto de conexión | |
|---|--------|---|----------------|
| Transformador asociado a tu factura: | 563338 | Longitud: | -76.0708371990 |
| Potencia instalada de generación: | 10 | Latitud: | 6.0938554340 |
| Cantidad de energía máxima que puede entregar en una hora [kW]: | 8 | Tensión nominal Cto. [kV]: | 13.20 |
| Entrega excedentes a la red?: | SI | Tensión Transformador Alta [kV]: | 7.621 |
| ¿Cuenta con almacenamiento o su Sistema de Generación es diferente a Solar? | NO | Tensión del punto de conexión [V]: | 120/240 |
| | | Capacidad nominal del transformador [kW]: | 10 |

Fuente: Geoportal EPM.

El operador al ingresar el número del transformador arroja la ubicación, la tensión del transformador en el devanado primario y el secundario, por último capacidad nominal; a continuación en la siguiente imagen se puede observar la disponibilidad para conectar el excedente a la red y explica las proporciones, para el caso de la truchera se puede inyectar con tranquilidad todo lo generado, al pasar por el inversor la energía es de 8 kWh en generación cuando el sistema está al máximo y sin consumo en la truchera, en la imagen se aprecia que el transformador puede recibir 8.6 kWh.

Figura 24. Disponibilidad de inyección a la red.



Fuente: Geoportal EPM.

Prediseño generación fotovoltaica.

Para el prediseño de la generación fotovoltaica se realizan cálculos para determinar la dimensión con base en los recibos de EPM suministrados por el dueño de la truchera y los datos recolectados por el analizador de redes.

Cálculo de la generación fotovoltaica y selección de equipos.

Después de obtener los datos de radiación solar y los promedios de consumo energético de la truchera (kWh/mes) se puede pasar a dimensionar los paneles solares y el inversor mediante formulación matemática.

Consumo de la truchera diario

Promedio energía total mes = 911,33 kWh/mes

$$\text{Energía total día (Etotal)} = \frac{911,33 \text{ kWh/mes}}{30 \text{ días}} \quad \text{Etotal} = 30,38 \text{ kWh}$$

Horas pico solar

$$\text{Hps} = 3,78$$

Eficiencia del sistema fotovoltaico

$$\eta (\%) = 0,85$$

Potencia fotovoltaica a instalar (P_{pot})

$$P_{\text{pot}} (\text{Wh}) = \frac{E_{\text{total}}}{\text{HPS} * \eta} \quad (4) \quad \text{De donde: } \frac{30,38}{3,78 * 0,85} = 9,454 \text{ kWh} \approx 10.000 \text{ Wh}$$

Selección del inversor

El campo fotovoltaico debe de ser mayor al inversor, lo indicado después analizar curvas de recorte en la generación es 1,18, de no poderse instalar con el máximo es admisible entre 9-18%, se va a dimensionar con el 18% por encima para una eficiencia óptima dentro de lo posible.

$$P_{\text{inv}} (\text{W}) = \frac{P_{\text{pot}}}{1,18} \quad (5) \quad \text{De donde: } \frac{10.000}{1,18} = 8.474,58 (\text{W}) \approx 8.000 (\text{W})$$

Para este inversor se va a trabajar con el costo de: Inversor (MINI 7000-10000 TL-X) de la tienda de Autosolar (*Autosolar | La Tienda de la Energía Solar*, s. f.), el cual tiene las siguientes especificaciones, que sirven para los cálculos que siguen.

Número de MPPT = 2

Máxima de corriente DC en entrada por cada MPPT (A) = 16,9

Máximo de Voltaje DC en entrada por cada MPPT (V) = 550

Mínimo de Voltaje DC en entrada por cada MPPT (V) = 100

Máxima de corriente salida AC (A) = 38.3

Eficiencia (%) = 98.1

Número de paneles solares

Los paneles solares seleccionados fueron de 500W, monocristalinos, de referencia JAM66S30 de la tienda Autosolar, (*Autosolar | La Tienda de la Energía Solar*, s. f.), con las siguientes especificaciones.

Potencia nominal (W) = 500

Voltaje de circuito abierto (V) = 45.72

Corriente de corto circuito (A) = 14

Eficiencia de los paneles (%) = 21.3

$$\text{Cantidad de W por cada MPPT (P MPPT)} = \frac{P_{\text{fot}}}{N_{\text{MPPT}}} \quad (6)$$

$$\text{De donde: } \frac{10.000 \text{ W}}{2} = 5.000 \text{ W}$$

$$\text{Número de paneles en cada MPPT} = \frac{P_{\text{MPPT}}}{P_{\text{panel}}} \quad (7) \quad \text{De donde: } \frac{5.000 \text{ W}}{500 \text{ W}} = 10$$

Total paneles de proyecto = 10 * 2 = 20

Tabla 8. Costo estimado del proyecto.

| Cantidad | Descripción | V. unitario (COP) | V. Total (COP) | V. Total (US) |
|-----------------------------|----------------------------|-------------------|----------------|---------------|
| 20 | Panel JAM66S30 | \$ 521.237 | \$ 10.424.740 | \$ 2.494,2 |
| 1 | Estructura Metálica | \$ 5.000.000 | \$ 5.000.000 | \$ 1.196,29 |
| 1 | Ductos y Cableado | \$ 4.500.000 | \$ 4.500.000 | \$ 1.076,66 |
| 1 | Protecciones y Gabinetes | \$ 7.000.000 | \$ 7.000.000 | \$ 1.674,81 |
| 1 | Medidor Bidireccional | \$ 1.246.380 | \$ 1.246.380 | \$ 298,71 |
| 1 | Mano de Obra | \$ 9.800.000 | \$ 9.800.000 | \$ 2.344,73 |
| 1 | Materiales de construcción | \$ 800.000 | \$ 800.000 | \$ 191,41 |
| Total Estimado del Proyecto | | | \$ 38.771.120 | \$ 9.276,3 |

| Cantidad | Descripción | V. unitario (COP) | V. Total (COP) | V. Total (US) |
|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|
| 20 | Panel JAM66S30 | \$ 521.237 | \$ 10.424.740 | \$ 2.494,2 |
| Valor estimado por kWh instalado | | | \$ 3.877.112 | \$ 927,63 |
| 1 | Inversor (MINI 7000-10000 TL-X) | \$ 5.560.752 | \$ 5.560.752 | \$ 1.330,45 |

Fuente. Propia

La operación y mantenimiento del sistema se estima para la anualidad, al tener en cuenta, una limpieza de los paneles solares cada dos meses a cargo del mayordomo de la truchera con una duración de 2 horas, una revisión técnica al inversor y a las conexiones por parte de un técnico electricista cada año, con un estimado total para este rubro de US \$ 28,71.

Dimensionamiento en HOMER Pro

Para facilitar el dimensionamiento de la generación fotovoltaica en el optimizador HOMER Pro se realiza una tabla resumen que contiene los datos proyectados.

Tabla 9. Resumen de datos para generación fotovoltaica.

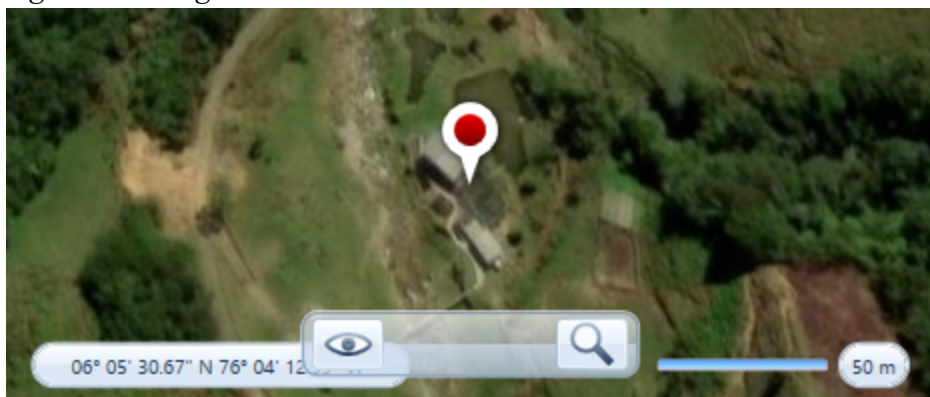
| Descripción y unidades | Cantidad |
|--|-----------------|
| Capacidad fotovoltaica a instalar (kW) | 10 |
| Potencia de lo paneles (W) | 500 |
| Eficiencia de los paneles (%) | 21.3 |
| Temperatura de operación (Celsius) | 45 |
| Costo por kW instalados (US\$) | 927,63 |
| Operación y mantenimiento anual paneles (US\$) | 28,71 |
| Vida útil (años) | 25 |
| Pérdida global del sistema (%) | 15 |
| Potencia del inversor (W) | 8.000 |
| Vida útil inversor (años) | 15 |
| Costo del inversor (US\$) | 1.330,45 |

| | |
|---|------|
| Costo de operación y mantenimiento anual (US\$) | 10 |
| Eficiencias del inversor (%) | 98,1 |

Fuente. propia

Para iniciar el dimensionamiento de la generación fotovoltaica en HOMER Pro se comienza por ingresar la ubicación geográfica de la truchera, ubicando el sitio tentativo para la generación fotovoltaica, así:


Figura 25. Imagen de Geolocalización en HOMER Pro.



Fuente. HOMER Pro.

Se realiza dimensionamiento de los paneles fotovoltaicos con las especificaciones dadas en la tabla resumen, se crean en las librerías del optimizador y se agregan al proyecto; así:

Figura 26. Resumen Paneles Fotovoltaicos "PV" en HOMER Pro.

| PV  | | Name: <input type="text" value="JA SOLAR JAM66S30"/> | Abbreviation: <input type="text" value="JAM66S"/> | <input type="button" value="Remove"/> <input type="button" value="Copy to Library"/> <input type="button" value="?"/> | | | | | | | | |
|--|---|--|---|---|--------------|------------------|---------------|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|
| Properties Name: JA SOLAR JAM66S30 Abbreviation: JAM66S30 Panel Type: Flat plate Rated Capacity (kW): 10 Temperature Coefficient: -0.390 Operating Temperature (°C): 45.00 Efficiency (%): 21.3 Manufacturer: JA SOLAR Data Sheet for Tallmax M Plus Notes: Relevant for utility-scale or | Cost <table border="1"> <thead> <tr> <th>Capacity (kW)</th> <th>Capital (\$)</th> <th>Replacement (\$)</th> <th>O&M (\$/year)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><input type="text" value="1"/></td> <td><input type="text" value="927.63"/></td> <td><input type="text" value="927.63"/></td> <td><input type="text" value="28.71"/></td> </tr> </tbody> </table> Lifetime: <input type="text" value="25.00"/> time (years): <input type="button" value="(-)"/> <input type="button" value="More..."/> | | | Capacity (kW) | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$/year) | <input type="text" value="1"/> | <input type="text" value="927.63"/> | <input type="text" value="927.63"/> | <input type="text" value="28.71"/> | Sizing <input type="radio"/> HOMER Optimizer™ <input checked="" type="radio"/> Search Space <input type="text" value="kW"/> <input type="text" value="0"/> <input type="text" value="10"/> |
| | Capacity (kW) | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$/year) | | | | | | | | |
| <input type="text" value="1"/> | <input type="text" value="927.63"/> | <input type="text" value="927.63"/> | <input type="text" value="28.71"/> | | | | | | | | | |
| Site Specific Input Derating Factor (%): <input type="text" value="85.00"/> <input type="button" value="(-)"/> | | | Electrical Bus <input type="radio"/> AC <input checked="" type="radio"/> DC | | | | | | | | | |

Fuente: HOMER Pro.

Por último paso de esta sección se tiene en cuenta el inversor y su valor por aparte del resto de los equipos y montaje, de igual manera se dimensiona y se agrega como se muestra a continuación.

Figura 27. Resumen de Inversor “Converter” en HOMER Pro.

The screenshot displays the configuration for a 'Converter' in HOMER Pro. At the top, the selected model is 'Growatt MIN 8000TL-X' with a 'Complete Catalog' button. The 'Name' field is 'Growatt MIN 8000TL-X' and the 'Abbreviation' is 'INV'. There are 'Remove' and 'Copy to Library' buttons. The 'Properties' section on the left shows the name, abbreviation, and a note: 'El Inversor Red Growatt MIN 10000TL-X es un producto de gran calidad y con un diseño muy compacto y moderno. Este es uno de los modelos monofásicos de'. The 'Costs' table is as follows:

| Capacity (kW) | Capital (\$) | Replacement (\$) | O&M (\$/year) |
|---------------|--------------|------------------|---------------|
| 8 | \$1,330.45 | \$1,330.45 | \$10.00 |

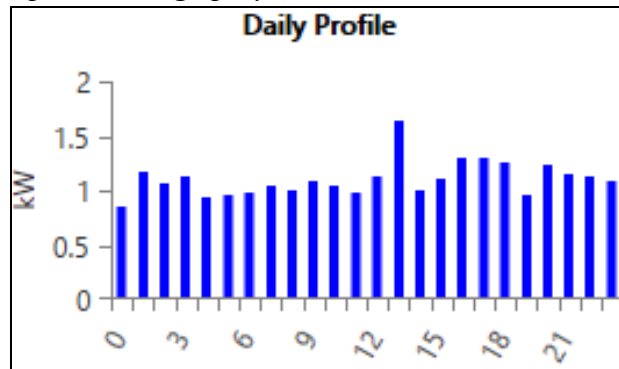
Below the table is a 'Click here to add new item' link and a 'Multiplier' section with three input fields. The 'Capacity Optimization' section has two radio buttons: 'HOMER Optimizer™' (selected) and 'Search Space'. The 'Search Space' section has a 'Size (kW)' input field with values 0 and 8. The 'Inverter Input' section has 'Lifetime (years): 15.00' and 'Efficiency (%): 98.10'. The 'Rectifier Input' section has 'Relative Capacity (%): 0.00' and 'Efficiency (%): 100.00'. A checkbox 'Parallel with AC Generator?' is checked. Logos for 'Generic homerenergy.com' and 'HOMER Energy' are visible at the bottom.

Fuente: HOMER Pro.

9.3 Comparación de los Subsistemas de Generación: Solar Fotovoltaica, Hidroeléctrica y Suministro de la Red

Para comenzar la comparación de los sistemas de generación hidroeléctrica, fotovoltaica y suministro de red es necesario ingresar a HOMER Pro dos cosas vitales que faltan, proyectar la carga y la red, se inicia ingresando al optimizar los valores recolectados con el analizador de redes, lo cual, crea una gráfica de barras que da una idea más clara del consumo diario de la carga, en el eje (Y) se muestra el consumo en kW y en el eje (X) las horas del día.

Figura 28. Gráfico de barras para la carga proyectada.



Fuente. HOMER Pro.

Para simular la red a la que la truchera está conectada se tienen en cuenta el valor del kWh consumido y pagado al comercializador de la red, también es tenido en cuenta el valor asociado a la generación, que para el caso de la truchera representa el valor que pagará el operador de red en caso de que existan excedentes de energía mensualmente.

Figura 29. Dimensionamiento de la carga en el software Homer pro

ADVANCED GRID Name: Grid Abbreviation: Grid Remove Copy To Library

Simple Rates Real Time Rates Scheduled Rates Grid Extension Grid

Parameters Emissions

Simple Rates ?

Grid Power Price (\$/kWh) 0.203 (-) (+)

Grid Net Excess Price (\$/kWh): 0.071 (-) (+)

Net Metering

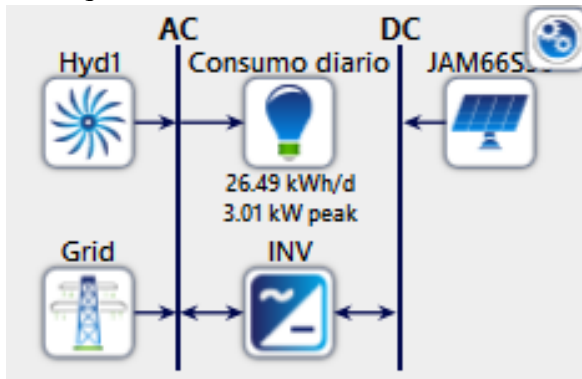
Net purchases calculated monthly

Net purchases calculated annually

Fuente. HOMER Pro.

A continuación en la siguiente imagen se muestra la forma en que queda la arquitectura total en la interfaz del optimizador para la generación fotovoltaica, hidroeléctrica, la red y la carga.

Figura 30. Arquitectura de los sistemas en HOMER Pro.

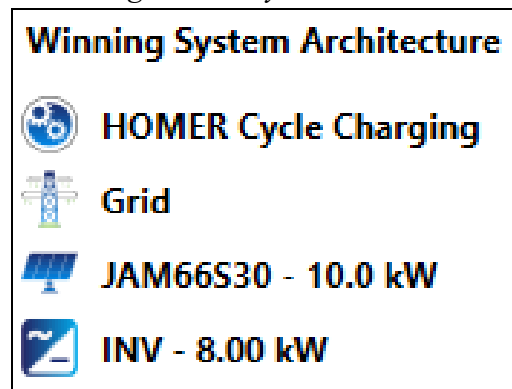


Fuente. HOMER Pro.

Simulaciones

Después de dimensionar los sistemas en el optimizador de HOMER Pro con los prediseños propuestos anteriormente, se genera el cálculo y el sistema muestra la arquitectura del sistema recomendado, seleccionando un sistemas con combinaciones entre la red, los paneles solares y el inversor, así:

Figura 31. Arquitectura de sistema sugerido PV y Red.



Fuente. HOMER Pro.

A continuación el sistema muestra una cuadrícula con la variedad de sistemas evaluados por el optimizador, en los cuales hace diferentes configuraciones entre la red, los paneles solares, el inversor y la turbina, les da un orden de mayor rentabilidad a menos rentabilidad, en forma descendente, cómo se muestra en la siguiente imagen.

Figura 32. Combinación de sistemas evaluados en el software Homer pro

| Architecture | | | | Cost | | | | System | | | Project Economics | | | JAM66S30 | |
|---------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|---------------|------------------------|------------|--------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------|----------------------------|--|
| JAM66S30 (kW) | Grid (kW) | Hyd1 (kW) | INV (kW) | Dispatch | NPC (\$) | LCOE (\$/kWh) | Operating cost (\$/yr) | CAPEX (\$) | Ren Frac (%) | Total Fuel (L/yr) | IRR (%) | Simple Payback (yr) | CAPEX | Energy Production (kWh/yr) | |
| 10.0 | 999,999 | | 8.00 | CC | \$12,711 | \$0.0561 | \$163.95 | \$10,607 | 68.3 | 0 | | | 9,276 | 12,289 | |
| | 999,999 | | | CC | \$25,186 | \$0.263 | \$1,963 | \$0.00 | 0 | 0 | | | | | |
| 10.0 | 999,999 | 1.87 | 8.00 | CC | \$25,752 | \$0.0997 | -\$63.33 | \$26,565 | 90.8 | 0 | | | 9,276 | 12,289 | |
| | 999,999 | 1.87 | | CC | \$27,657 | \$0.220 | \$81,775 | \$15,958 | 63.6 | 0 | | | | | |

Fuente. HOMER Pro.

Para cada sistema se puede exportar un informe en un documento, donde relaciona retribución sencilla, retorno de la inversión y tasa interna de retorno, muestra la penetración de cada una de las fuentes de generación eléctrica, para el consumo energético de la truchera, el comportamiento de compra/venta de energía con el operador de red para cada caso, entre otra información relevante, como, el flujo de caja y la información detallada de generación de las fuentes.

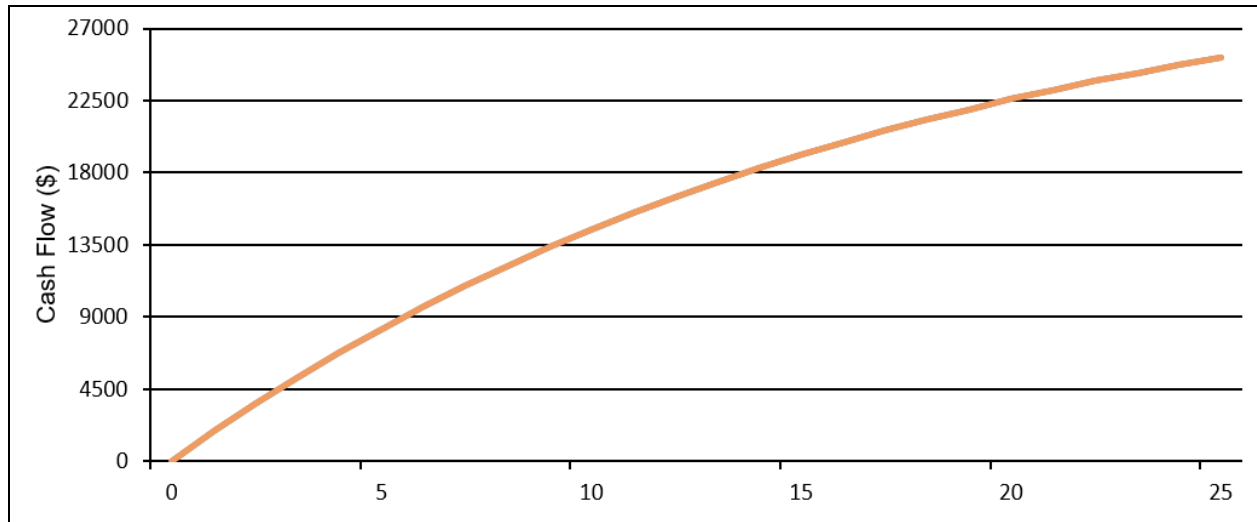
Caso Red

El sistema actual se refiere a la operación de la microred únicamente conectada a la red eléctrica, sin generación fotovoltaica, ni generación hidroeléctrica, los puntos clave del análisis son:

Gráfico de resultados financieros.

El sistema muestra un costo de operación anual de USD \$1,963 o aproximadamente COP \$8,204,535, este es el gasto anual por la energía consumida exclusivamente de la red eléctrica, al ser un sistema basado completamente en la red, estos costos son recurrentes y no hay generación propia que reduzca la dependencia, esto implica que toda la demanda energética se satisface comprando electricidad, lo que genera una alta vulnerabilidad ante variaciones en el precio de la energía o interrupciones en el servicio.

Figura 33. Gráfico de resultados financieros caso Red.



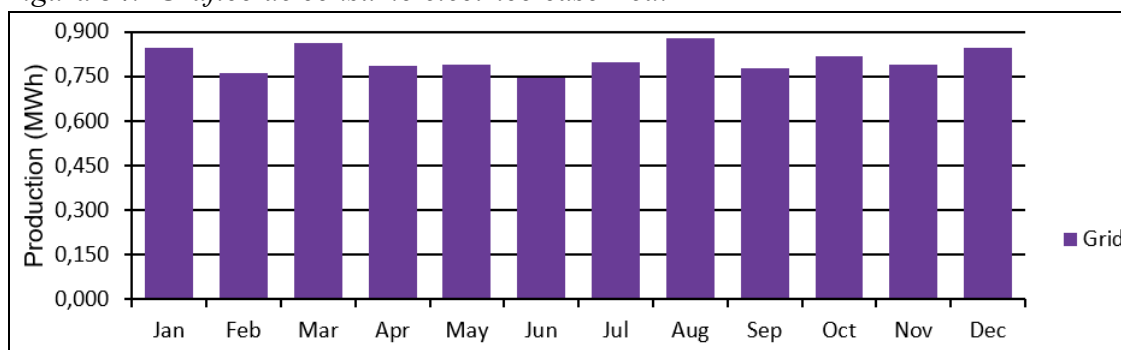
Fuente. HOMER Pro.

En la gráfica de resultados financieros a lo largo de 25 años, el sistema actual sigue generando un costo constante, no hay retorno de inversión y el valor presente neto (VPN) de este sistema es negativo, dado que sólo incurre en costos y no tiene ahorros o ingresos adicionales por generación propia.

Gráfico de consumo eléctrico

El consumo eléctrico describe las necesidades energéticas de la truchera en función de su demanda diaria y pico de potencia para el sistema actual:

Figura 34. Gráfico de consumo eléctrico caso Red.



Fuente. HOMER Pro.

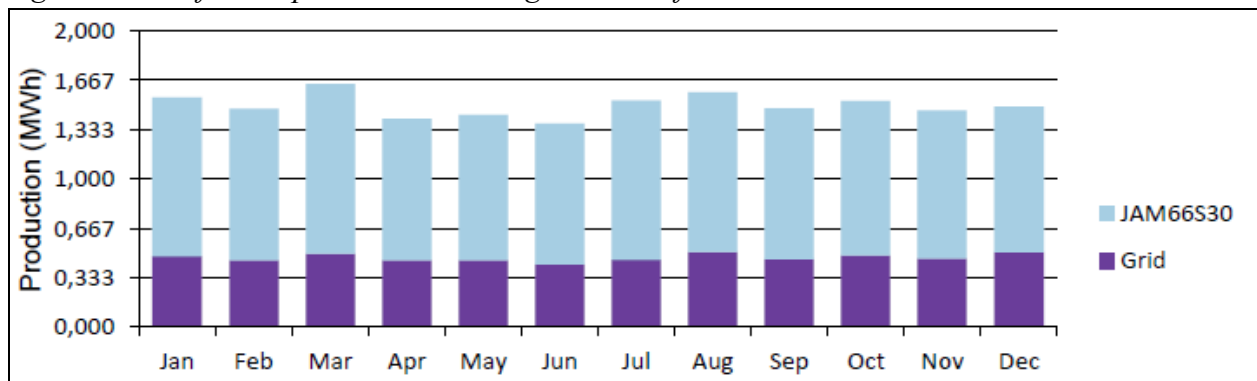
El gráfico muestra que la energía se compra de la red de manera constante a lo largo del año, estos valores se mantienen relativamente estables, lo que indica que el consumo de la truchera no tiene fluctuaciones significativas; aquí está reflejado el perfil de la carga energética que se necesita satisfacer.

Combinación fotovoltaica y red, en comparación con la red.

Gráfico de penetración de la generación fotovoltaica.

Este gráfico es crucial para entender cómo el sistema fotovoltaico se ajusta a la demanda energética de la truchera, sugiere que el sistema solar no solo cubre la demanda, sino que también genera un excedente de energía, lo que mejora aún más la rentabilidad para la viabilidad del proyecto.

Figura 35. Gráfico de penetración de la generación fotovoltaica.



Fuente. HOMER Pro.

En el gráfico se identifica en el eje (Y) la producción MWh, tanto de la red como de la generación fotovoltaica para el consumo de la truchera, en eje (X) se muestran los meses del año, el color azul claro representa la producción de los paneles solares y el morado la energía tomada de la red.

Se ve en el gráfico que esta producción de energía fotovoltaica es suficiente para cubrir la demanda de la microrred y permitir la venta del excedente al operador de red, con base en el gráfico de penetración de las fuentes energéticas, que se mostró anteriormente y cotejado con el

promedio mensual de consumo, con el que se crearon los prediseños que es de 911.33 kWh/mes, tomados del recibo de servicios públicos.

Tabla del comportamiento de la red eléctrica

La tabla del comportamiento de la red eléctrica presenta un balance entre la energía consumida e inyectada a la red y sus costos asociados.

Tabla 10. Comportamiento de la generación fotovoltaica.

| Month | Energy Purchased (kWh) | Energy Sold (kWh) | Net Energy Purchased (kWh) | Peak Load (kW) | Energy Charge | Demand Charge | Total |
|-----------|------------------------|-------------------|----------------------------|----------------|---------------|---------------|----------|
| January | 479 | 681 | -202 | 1.96 | -\$14.34 | \$0.00 | -\$14.34 |
| February | 433 | 665 | -232 | 1.98 | -\$16.48 | \$0.00 | -\$16.48 |
| March | 498 | 755 | -257 | 2.00 | -\$18.24 | \$0.00 | -\$18.24 |
| April | 449 | 600 | -151 | 2.02 | -\$10.74 | \$0.00 | -\$10.74 |
| May | 449 | 623 | -174 | 2.15 | -\$12.36 | \$0.00 | -\$12.36 |
| June | 423 | 611 | -188 | 1.93 | -\$13.38 | \$0.00 | -\$13.38 |
| July | 455 | 713 | -258 | 2.17 | -\$18.33 | \$0.00 | -\$18.33 |
| August | 506 | 684 | -179 | 2.02 | -\$12.69 | \$0.00 | -\$12.69 |
| September | 457 | 677 | -220 | 2.38 | -\$15.61 | \$0.00 | -\$15.61 |
| October | 481 | 686 | -205 | 2.37 | -\$14.54 | \$0.00 | -\$14.54 |
| November | 465 | 654 | -189 | 2.11 | -\$13.42 | \$0.00 | -\$13.42 |
| December | 505 | 623 | -118 | 2.11 | -\$8.40 | \$0.00 | -\$8.40 |
| Annual | 5,600 | 7,973 | -2,374 | 2.38 | - | \$0.00 | - |
| | | | | | \$168.53 | | \$168.53 |

Fuente. HOMER Pro.

En la tabla se puede observar la energía consumida de la red 5,600 kWh/año, esto representa la cantidad de energía que el sistema debe adquirir de la red para cubrir las necesidades cuando la producción solar no es suficiente (la noche o sombras durante el día), también muestra la energía inyectada 7,973 kWh/año, este valor es el excedente de energía generado por los paneles solares que se inyecta de vuelta a la red, estos dos valores son los que hacen parte del intercambio en el medidor bidireccional.

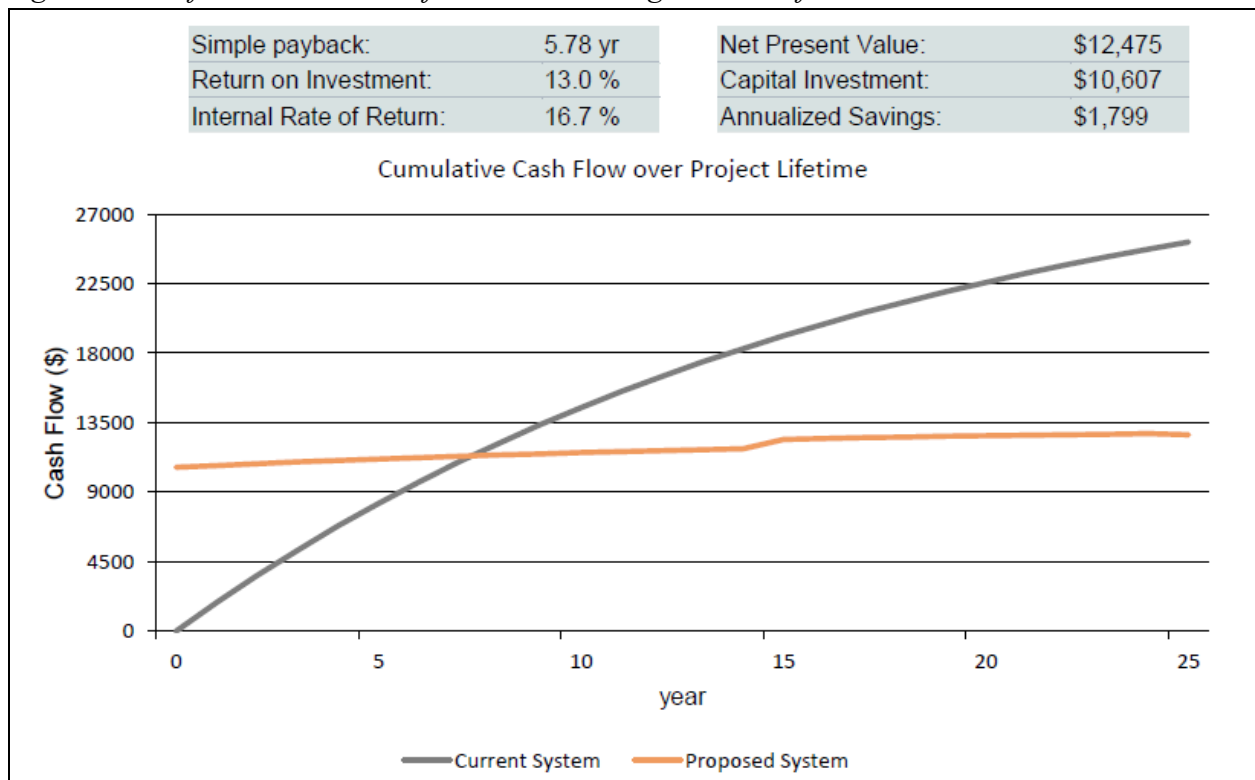
El sistema inyecta más energía a la red de la que consume, resultando en un balance energético positivo de 2,374 kWh/año, lo cual significa que la truchera de Urrao Antioquia estaría generando ingresos adicionales al vender los excedentes, debido a la venta de energía al operador de red, el costo está negativo porque está siendo una ganancia, USD \$168.53/año o COP \$ 704,386/año.

El optimizador HOMER Pro arroja los resultados de esta combinación a través Tablas y gráficas las cuales se van a explicar en cada paso.

Gráfico de resultados financieros.

Este gráfico muestra los resultados financieros clave del sistema propuesto en comparación con el sistema actual basado en la red.

Figura 36. Gráfico de resultados financieros de la generación fotovoltaica.



Fuente. HOMER Pro.

En el gráfico se pueden identificar los aspectos más importantes, tales como, la recuperación de la inversión inicial en 5,78 años que se presenta cuando se unen las 2 líneas, después de este período, el sistema comienza a generar ahorros netos acumulados y se puede aproximar el ahorro en los 25 años, muestra la tasa interna de retorno (TIR) de 16.7%, la cual refleja la rentabilidad del proyecto en comparación con la planteada inicialmente que fue del 12% y ofrece un buen retorno en comparación con otros sistemas, a su vez el retorno sobre la inversión anualizado (ROI), muestra que, en promedio, el sistema ofrece un 13% de retorno sobre el capital invertido, este valor es indicativo de la eficiencia económica del sistema y lo hace atractivo desde una perspectiva de inversión.

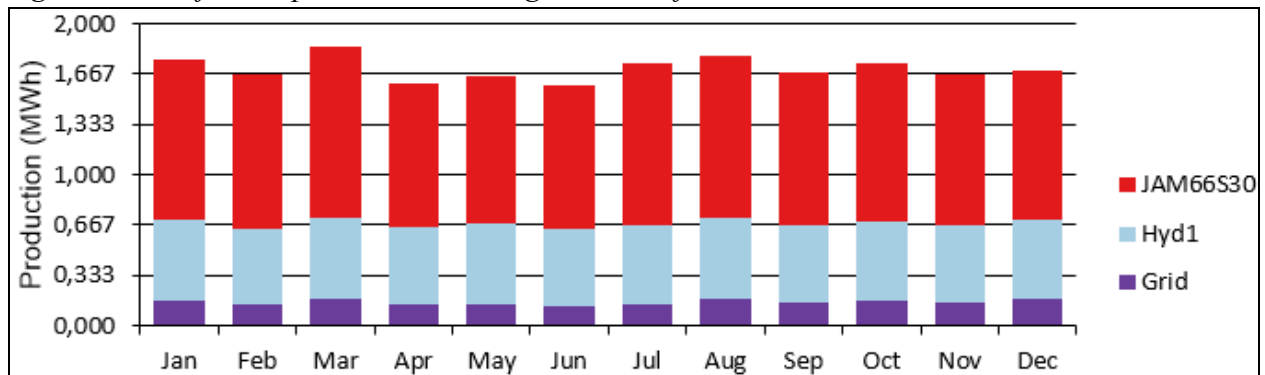
El gráfico refleja que el Valor Presente Neto (VPN) de \$12,475, es positivo, lo que confirma que el sistema fotovoltaico genera beneficios netos durante su vida útil, este gráfico de resultados financieros deja claro que la inversión inicial de \$10,607 es recuperada rápidamente y que el sistema produce ganancias considerables a lo largo de su vida útil, justificando económicamente la adopción de la tecnología fotovoltaica.

- **Combinación fotovoltaica, red e hidráulica, en comparación con la red.**

El software arroja los resultados de esta combinación.

Gráfico de penetración de la generación fotovoltaica e hidráulica.

Figura 37. Gráfico de penetración de la generación fotovoltaica e hidráulica.



Fuente. HOMER Pro.

En este gráfico podemos inspeccionar que tanta energía se provee de cada fuente energética y como es de esperarse, aparecen las 3, acometida de operador de red, paneles solares y generador hidroeléctrico, cada uno con su producción asociada en MWh por mes.

Al igual que el sistema anterior se evidencia que las energías de autogeneración son suficientes para cubrir la demanda de la microrred y permitir la venta del excedente al operador de red, con base en el gráfico de penetración de las fuentes energéticas que se muestran y al cotejar con los consumos reales de la truchera.

Tabla del comportamiento de la red eléctrica

Tabla 11. Comportamiento de la red eléctrica de generación fotovoltaica e hidroeléctrica.

| Month | Energy Purchased (kWh) | Energy Sold (kWh) | Net Energy Purchased (kWh) | Peak Load (kW) | Energy Charge | Demand Charge | Total |
|-----------|------------------------|-------------------|----------------------------|----------------|---------------|---------------|----------|
| January | 166 | 898 | -732 | 1.25 | -\$51.97 | \$0.00 | -\$51.97 |
| February | 141 | 852 | -711 | 1.27 | -\$50.47 | \$0.00 | -\$50.47 |
| March | 178 | 965 | -787 | 1.28 | -\$55.87 | \$0.00 | -\$55.87 |
| April | 142 | 806 | -664 | 1.31 | -\$47.16 | \$0.00 | -\$47.16 |
| May | 145 | 849 | -704 | 1.44 | -\$49.99 | \$0.00 | -\$49.99 |
| June | 125 | 827 | -701 | 1.21 | -\$49.80 | \$0.00 | -\$49.80 |
| July | 140 | 928 | -788 | 1.45 | -\$55.96 | \$0.00 | -\$55.96 |
| August | 180 | 889 | -709 | 1.31 | -\$50.33 | \$0.00 | -\$50.33 |
| September | 148 | 880 | -733 | 1.67 | -\$52.02 | \$0.00 | -\$52.02 |
| October | 161 | 896 | -735 | 1.65 | -\$52.17 | \$0.00 | -\$52.17 |
| November | 150 | 852 | -702 | 1.40 | -\$49.83 | \$0.00 | -\$49.83 |
| December | 177 | 825 | -648 | 1.40 | -\$46.03 | \$0.00 | -\$46.03 |
| Annual | 1,853 | 10,467 | -8,614 | 1.67 | - | \$0.00 | - |
| | | | | | \$611.60 | | \$611.60 |

Fuente. HOMER Pro.

En la tabla se puede observar la energía consumida de la red 1.853 kWh/año, es relativamente baja debido a la alta penetración de las fuentes energéticas propuestas, también muestra el excedente de energía inyectada a la red 10.467 kWh/año, es evidente que el sistema es altamente productivo, es claro que el sistema inyecta más energía a la red de la que consume,

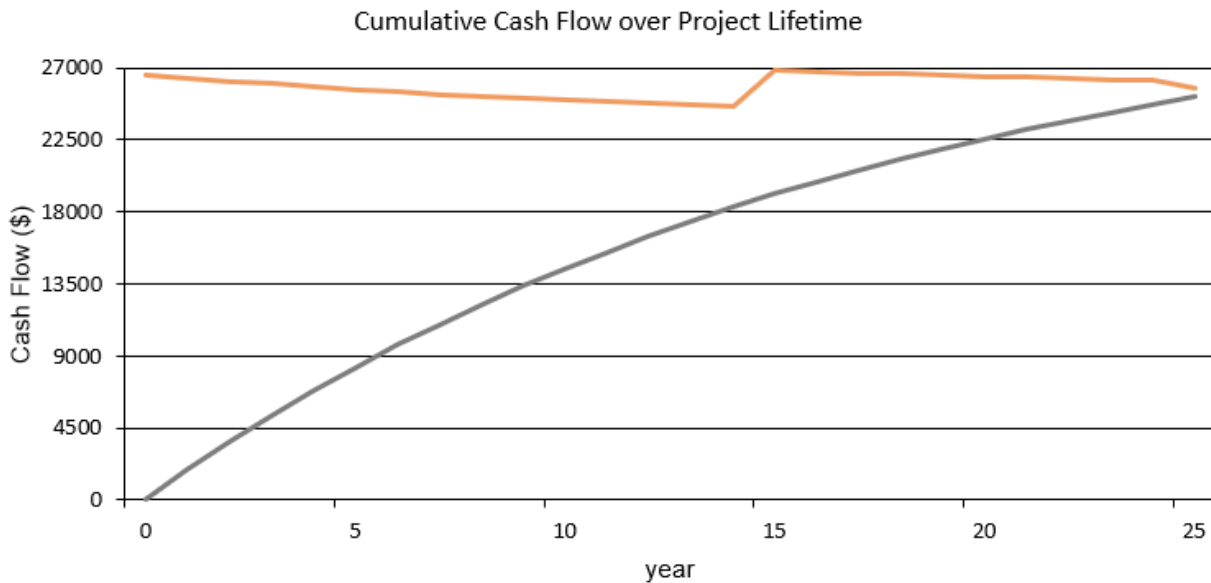
lo cual refleja en un balance energético positivo de 8.614 kWh/año, lo cual significa que la truchera de Urrao Antioquia genera ingresos adicionales al vender los excedentes al operador.

Gráfico de resultados financieros.

Este gráfico muestra los resultados financieros clave del sistema propuesto en comparación con el sistema actual basado en la red.

Figura 38. Gráfico de resultados financieros de generación fotovoltaica e hidroeléctrica.

| | | | |
|--------------------------|---------|---------------------|-----------|
| Simple payback: | 12.2 yr | Net Present Value: | -\$566.22 |
| Return on Investment: | 3.63 % | Capital Investment: | \$26,565 |
| Internal Rate of Return: | 5.73 % | Annualized Savings: | \$2,026 |



Fuente. HOMER Pro.

Para este caso, los resultados no son buenos, ya que el valor del proyecto es demasiado alto y en 25 años solo con la red de EPM se está pagando aproximadamente lo mismo, puede que si se proyecte a más años se puede recuperar e incluso generar ganancias, pero para este tipo de proyectos lo que se busca es retornar el capital inicial y empezar a generar ganancias lo más rápido posible.

Se indica que tiene un retorno simple de 12.2 años y una TIR (Tasa de retorno interno) de 5.73%, lo cual no cumple con las expectativas del proyecto de la truchera, ya que, inicialmente se fijó en 12%, lo cual resulta desfavorable para factibilidad de esta inversión.

El gráfico refleja que el Valor Presente Neto (VPN) de \$ -566.22, es negativo, confirma que el sistema con la combinación red, fotovoltaico e hidráulico no genera beneficios netos durante su vida útil, este valor representa la distancia que existe entre la línea gris que representa el valor de la red y la naranja que representa el valor del sistema propuesto.

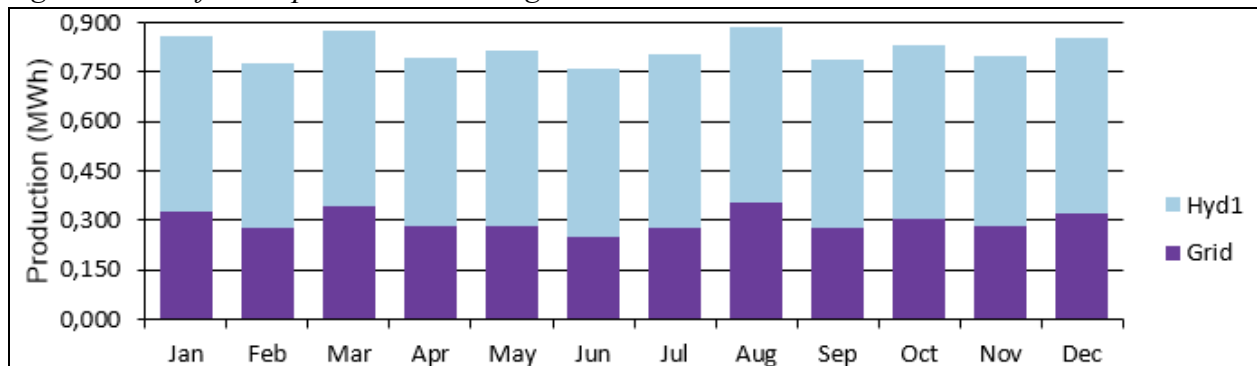
Combinación hidráulica y red, en comparación con la red.

Estos son los resultados arrojados por el software HOMER Pro para esta combinación.

Gráfico de penetración de la generación hidráulica.

El sistema propuesto incorpora en una microrred una autogeneración hidroeléctrica y la red existente, mostrando su penetración en el consumo de la truchera de Urrao Antioquia.

Figura 39. Gráfico de penetración de la generación del sistema hidroeléctrico.



Fuente. HOMER Pro.

En el gráfico se evidencia un sistema con una capacidad de generación que cubre más de la mitad de las necesidades energéticas de la microrred, para el caso actual no alcanza a cubrir en su totalidad la necesidad energética de la truchera en ningún momento, sin embargo, es para destacar que, la hidroeléctrica tiene la capacidad de generar todo el año, lo que asegura un suministro continuo de energía.

Tabla del comportamiento de la red eléctrica

Tabla 12. Comportamiento de la red eléctrica de generación hidroeléctrica.

| Month | Energy Purchased (kWh) | Energy Sold (kWh) | Net Energy Purchased (kWh) | Peak Load (kW) | Energy Charge | Demand Charge | Total |
|-----------|------------------------|-------------------|----------------------------|----------------|---------------|---------------|----------|
| January | 327 | 9.24 | 318 | 1.83 | \$64.45 | \$0.00 | \$64.45 |
| February | 269 | 11.5 | 258 | 1.76 | \$52.37 | \$0.00 | \$52.37 |
| March | 346 | 12.8 | 333 | 1.80 | \$67.59 | \$0.00 | \$67.59 |
| April | 283 | 11.2 | 272 | 2.08 | \$55.13 | \$0.00 | \$55.13 |
| May | 284 | 24.6 | 259 | 2.08 | \$52.63 | \$0.00 | \$52.63 |
| June | 248 | 16.2 | 232 | 1.70 | \$47.00 | \$0.00 | \$47.00 |
| July | 277 | 10.8 | 266 | 1.69 | \$53.95 | \$0.00 | \$53.95 |
| August | 354 | 6.11 | 348 | 1.70 | \$70.67 | \$0.00 | \$70.67 |
| September | 275 | 12.1 | 263 | 1.73 | \$53.35 | \$0.00 | \$53.35 |
| October | 303 | 13.5 | 289 | 2.40 | \$58.69 | \$0.00 | \$58.69 |
| November | 284 | 8.64 | 275 | 1.58 | \$55.91 | \$0.00 | \$55.91 |
| December | 324 | 7.38 | 316 | 1.57 | \$64.22 | \$0.00 | \$64.22 |
| Annual | 3,573 | 144 | 3,428 | 2.40 | \$695.96 | \$0.00 | \$695.96 |

Fuente. HOMER Pro.

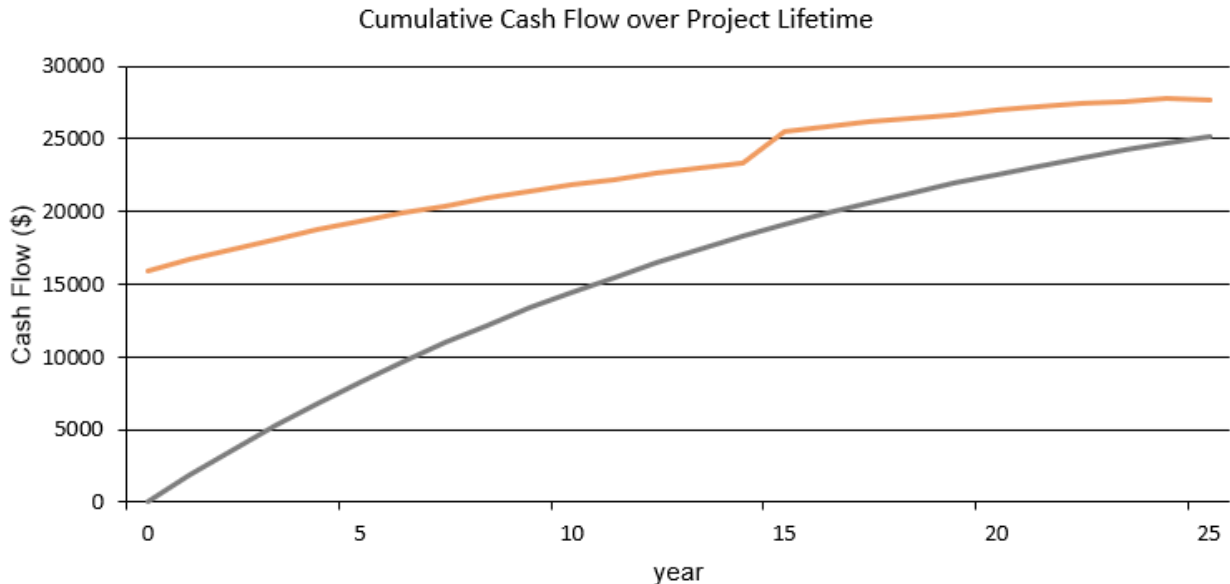
Con el modelo hidráulico propuesto, se tiene que seguir comprando continuamente parte de la energía eléctrica al operador de red, aproximadamente US \$695,96/año o COP \$2,908,827, este consumo está relacionado con los períodos donde la hidroeléctrica no puede cubrir toda la demanda y los pequeños excedentes inyectados a la red ocurren cuando la generación hidroeléctrica excede las necesidades en momentos de baja demanda.

Gráfico de resultados financieros.

Para la micro red propuesta a continuación se destacan los principales resultados financieros:

Figura 40. Gráfico de resultados financieros generación hidroeléctrica.

| | | | |
|--------------------------|---------|---------------------|----------|
| Simple payback: | 13.7 yr | Net Present Value: | -\$2,471 |
| Return on Investment: | 2.58 % | Capital Investment: | \$15,958 |
| Internal Rate of Return: | 4.24 % | Annualized Savings: | \$1,051 |



Fuente. HOMER Pro.

Para el caso de la generación hidráulica se tiene que el retorno simple se da a los 13,7 años aproximadamente, pero el costo de operación, el mantenimiento y de compra de energía al operador de red, es muy elevado para este sistema, tanto que, si lo se compara con el consumo solamente la red del operador en los 25 años, el sistema de generación hidráulico es más costoso y genera más recargos a lo largo del tiempo. Obviamente para el análisis técnico económico, lo que buscamos es reducir los costos a mediano plazo y este modelo no resulta atractivo.

Se indica que la tasa interna de retorno es de 4,24%, muy baja en comparación al 12% que se espera, el gráfico refleja que el Valor Presente Neto (VPN) de \$ -2.471, es negativo, confirma que el sistema hidráulico no genera beneficios netos durante su vida útil y por lo contrario está generando más costo que el del caso red, este valor representa la distancia que existe entre la línea gris que muestra el comportamiento del valor de la red que ya se está

pagando anualmente y la naranja que representa el comportamiento del valor del sistema propuesto.

9.4 Determinación del Sistema Óptimo de Suministro Energético para la Truchera

Al indicar al optimizador HOMER Pro que haga una optimización de los sistemas y no tenga en cuenta los prediseños establecidos en el trabajo, solo su costo asociado, el arroja una combinación de los sistemas ya optimizados y sugiere los sistema a instalar, así:

Nota: Para el caso de estudio de la truchera de Urrao Antioquia ,sólo se pueden optimizar los paneles fotovoltaicos y el inversor, debido a que, HOMER Pro, no tiene acceso a los datos de hidrología actualizados de las quebradas Santa Isabel y Montenegro, estas no cuenta con sistemas de monitoreo continuo conocido.

Tabla 13. Configuración de sistemas optimizados.

| Architecture | | | | | | | Cost | | | | System | | | Pr |
|---------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|---------------|------------------------|------------|--------------|-------------------|---------|--|--|----|
| JAM66S30 (kW) | Grid (kW) | Hyd1 (kW) | INV (kW) | Dispatch | NPC (\$) | LCOE (\$/kWh) | Operating cost (\$/yr) | CAPEX (\$) | Ren Frac (%) | Total Fuel (L/yr) | IRR (%) | | | |
| 8.38 | 999,999 | | 5.95 | CC | \$12,064 | \$0.0597 | \$257.46 | \$8,760 | 63.5 | 0 | 19 | | | |
| 3.03 | 999,999 | 1.87 | 2.20 | CC | \$23,092 | \$0.149 | \$308.16 | \$19,137 | 81.6 | 0 | 7.1 | | | |
| | 999,999 | | | CC | \$25,186 | \$0.203 | \$1,963 | \$0.00 | 0 | 0 | | | | |
| | 999,999 | 1.87 | | CC | \$27,657 | \$0.220 | \$911.75 | \$15,958 | 63.6 | 0 | 4.2 | | | |

Fuente. HOMER Pro.

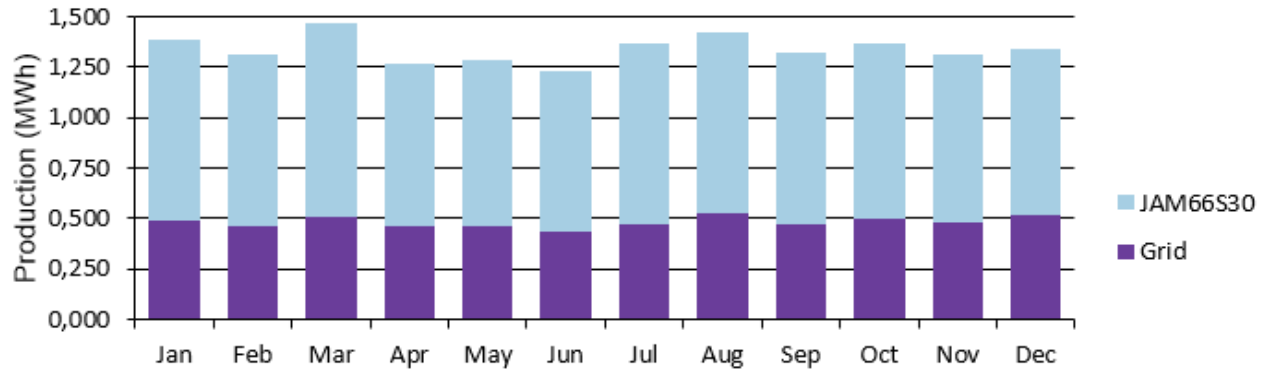
Sistema optimizado

HOMER Pro indica que el mejor sistema posible es combinar una producción de 8,38 kW de paneles solares con un inversor de 5,95 kW interconectado en una microrred con el operador EPM.

Gráfico de penetración de la generación fotovoltaica sugerida.

Este gráfico proporciona información sobre el perfil de penetración de la generación fotovoltaica de la microrred sugerida por HOMER Pro:

Figura 41. Gráfico de penetración de la generación fotovoltaica del sistema optimizado.



Fuente. HOMER Pro.

El gráfico indica una penetración energética moderada, que podría cubrir con los paneles solares la mayor parte de la demanda energética de la truchera, esto significa que, en algunos momentos, se generará más energía de la que se necesita, permitiendo la inyección del excedente a la red y el resto del tiempo consumo del operador.

Tabla del comportamiento de la red eléctrica

Esta tabla aclara la duda que dejaba el gráfico anterior, establece con claridad el consumo, el excedente y el retorno económico por parte del operador de red para la truchera de Urrao Antioquia.

Tabla 14. Comportamiento de la red eléctrica del sistema optimizado.

| Month | Energy Purchased (kWh) | Energy Sold (kWh) | Net Energy Purchased (kWh) | Peak Load (kW) | Energy Charge | Demand Charge | Total |
|-----------|------------------------|-------------------|----------------------------|----------------|---------------|---------------|---------|
| January | 490 | 519 | -28.5 | 1.96 | -\$2.03 | \$0.00 | -\$2.03 |
| February | 443 | 511 | -67.6 | 1.98 | -\$4.80 | \$0.00 | -\$4.80 |
| March | 509 | 573 | -63.4 | 2.00 | -\$4.50 | \$0.00 | -\$4.50 |
| April | 463 | 455 | 8.27 | 2.02 | \$1.68 | \$0.00 | \$1.68 |
| May | 464 | 474 | -10.9 | 2.19 | - | \$0.00 | - |
| | | | | | \$0.771 | | \$0.771 |
| June | 436 | 469 | -32.9 | 1.93 | -\$2.33 | \$0.00 | -\$2.33 |
| July | 468 | 549 | -81.7 | 2.17 | -\$5.80 | \$0.00 | -\$5.80 |
| August | 522 | 524 | -2.14 | 2.02 | - | \$0.00 | - |
| | | | | | \$0.152 | | \$0.152 |
| September | 469 | 515 | -46.2 | 2.39 | -\$3.28 | \$0.00 | -\$3.28 |
| October | 495 | 524 | -29.8 | 2.37 | -\$2.12 | \$0.00 | -\$2.12 |
| November | 477 | 499 | -21.5 | 2.11 | -\$1.52 | \$0.00 | -\$1.52 |
| December | 518 | 475 | 43.5 | 2.11 | \$8.83 | \$0.00 | \$8.83 |
| Annual | 5,754 | 6,086 | -333 | 2.39 | - | \$0.00 | - |
| | | | | | \$16.79 | | \$16.79 |

Fuente. HOMER Pro.

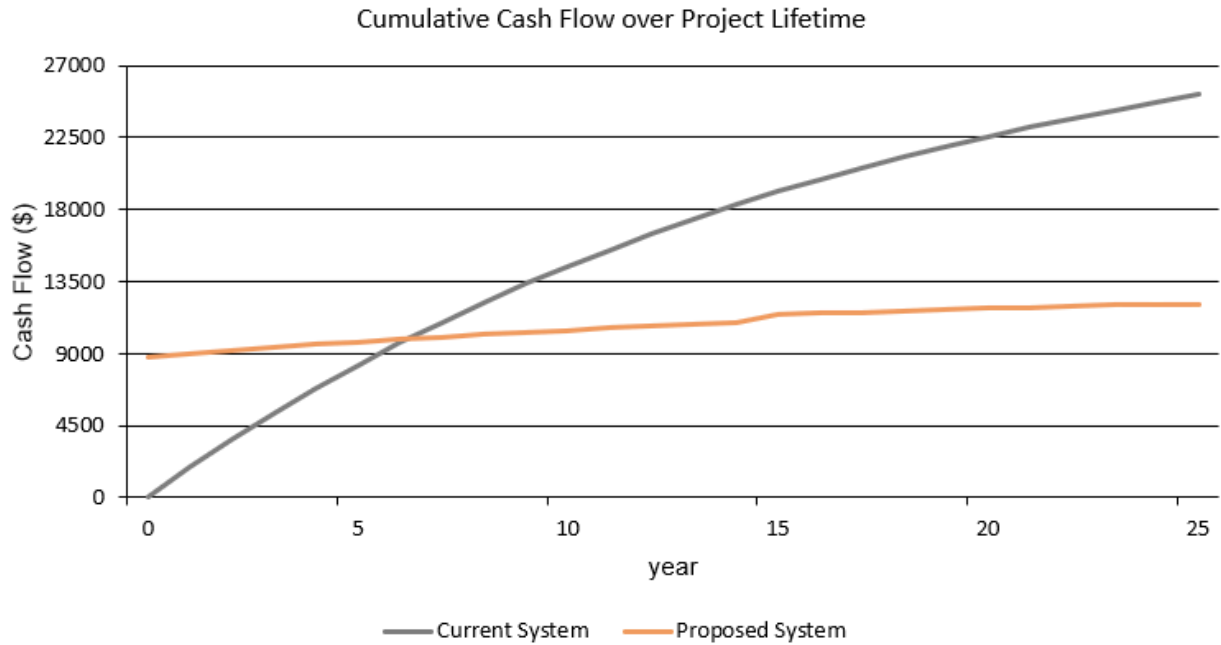
Acá se observa más a detalle que se trata de entregar siempre energía eléctrica a la red para luego consumir en los momentos de baja producción, con este sistema se inyecta a la red 6.086 kWh/año y se consume de la red 5.754 kWh/año, lo cual deja unos pequeños excedentes que no son representativos, entre más ajustados se esté en la entrega de excedentes, es más rentable para un proyecto pequeño, debido a que, la compra de la energía por parte del operador de red es muy baja y no es rentable para el proyecto. Se tiene un excedente de 333 kWh/año con un retorno del operador de red en dinero de USD \$16,79/año o COP \$70.175/año.

Gráfico de resultados financieros.

El sistema propuesto por HOMER Pro fue está diseñado para reducir significativamente los costos operativos de la microred, lo cual genera mayor viabilidad para el proyecto:

Figura 42. Gráfico de resultados financieros del sistema optimizado.

| | | | |
|--------------------------|---------|---------------------|----------|
| Simple payback: | 5.06 yr | Net Present Value: | \$13,122 |
| Return on Investment: | 15.5 % | Capital Investment: | \$8,760 |
| Internal Rate of Return: | 19.4 % | Annualized Savings: | \$1,705 |



Fuente. HOMER Pro.

El gráfico muestra una reducción significativa en el costo del valor inicial del proyecto en comparación con otra configuración de paneles solares más la red que se tenía antes, este está ubicado por debajo de los US \$9000 y adicionalmente muestra un ligero aplanamiento en la curva luego al tiempo de retorno simple, también un breve aumento en el Valor Presente Neto (VPN).¹⁴⁴

El software presenta el retorno simple más bajo que se tiene hasta ahora con 5.06 años y con unos costos muy estables en la línea de tiempo; tasa interna de retorno del 19,4% que está muy por arriba del 12% esperado y a los 25 años se tiene aproximadamente una devolución en dinero por parte del operador de red de USD \$13,500 o \$56,424,465, la más alta hasta ahora.

9.5 Valor agregado de autogeneración con energías renovables

La autogeneración con energías renovables ha ganado una importancia crítica en las últimas décadas debido a la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de desarrollar fuentes de energía sostenibles.

Las energías renovables, como la solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica, no producen emisiones directas de gases de efecto invernadero durante su operación. Esto contribuye significativamente a la mitigación del cambio climático y la mejora de la calidad del aire. A diferencia de los combustibles fósiles, las fuentes de energía renovable son prácticamente inagotables. Su utilización ayuda a conservar recursos naturales finitos y reduce la degradación ambiental asociada con la extracción de combustibles fósiles. La transición hacia energías renovables puede ayudar a proteger ecosistemas vulnerables al reducir la necesidad de actividades extractivas y disminuir la contaminación asociada con la producción de energía convencional.

El sector de las energías renovables es una fuente importante de creación de empleo. Desde la fabricación de componentes hasta la instalación y mantenimiento de sistemas, ofrece una amplia gama de oportunidades laborales, además, puede impulsar las economías locales, especialmente en áreas rurales, a través de inversiones, creación de empleos y aumento de los ingresos fiscales.

Las tecnologías renovables pueden proporcionar acceso a la energía en áreas remotas o subdesarrolladas, mejorando la calidad de vida y las oportunidades económicas para comunidades marginadas, reducir la contaminación del aire y del agua asociada con las fuentes de energía convencionales, estas contribuyen a mejorar la salud pública y reducir los costos de atención médica.

Además, con la ayuda de IA se estima que en un sistema eléctrico de generación centralizada como lo es en su gran mayoría el de Colombia, se presentan pérdidas por transporte de energía eléctrica entre el 10% y el 15% de la energía generada, asociados a las distancias entre centros de generación y puntos de consumo, estado y tecnología de la infraestructura de transmisión, condiciones climáticas y voltaje utilizado en las líneas. Con el modelo de

autogeneración no se asocia esta cantidad de pérdidas y se aporta a un modelo de uso racional y eficiente de la energía.

10 Conclusiones

El estudio de viabilidad técnico-económica para la truchera ubicada en Urrao, Antioquia, demostró que la generación hidroeléctrica es factible técnicamente, pero no viable económicamente respecto a otras alternativas que se pueden implementar. Desde el punto de vista técnico, los recursos disponibles son suficientes para garantizar una generación continua de energía eléctrica a pequeña escala, cubriendo una parte importante de la demanda energética de la truchera. Sin embargo, en el aspecto económico, los costos de implementación, operación y mantenimiento muestran que, la inversión inicial es elevada y la picocentral hidroeléctrica no ofrece beneficios económicos a largo plazo como se espera. Esta representa ventajas ambientales, sociales y técnicas, pero no económicas.

Con base en el análisis del estudio de viabilidad técnico-económica para la generación fotovoltaica del suministro de energía para la truchera ubicada en Urrao, Antioquia, se concluye que la implementación de un sistema fotovoltaico es viable tanto técnica como económicamente, los resultados técnicos indican que la radiación solar en la zona es suficiente para asegurar una generación fotovoltaica, que, en algunos momentos, generará un excedente que podrá ser inyectado a la red, para luego realizar compensación del consumo en el medidor bidireccional y en términos económicos, el sistema fotovoltaico reducirá los costos operativos a mediano plazo, además generará buenas ganancias en el tiempo establecido del proyecto de 25 años

El estudio técnico-económico llevado a cabo a través del software HOMER Pro demostró que, aunque tanto la energía hidroeléctrica como la fotovoltaica presentan ventajas en términos de sostenibilidad, el sistema fotovoltaico ofrece mayores beneficios financieros y una recuperación de la inversión más rápida; la energía fotovoltaica tiene un costo de inversión inicial relativamente bajo y un periodo de retorno de 5.06 años, mientras que la opción hidroeléctrica mostró una recuperación de 13.7 años y un valor presente neto negativo, lo que la hace menos viable a largo plazo.

La evaluación técnico-económica realizada para la truchera en Urrao, Antioquia, utilizando el software HOMER Pro, concluye que la opción más eficiente y rentable es un sistema de generación fotovoltaica respaldado por la red eléctrica del operador, este sistema

garantiza un suministro energético sostenible, con un período de recuperación de la inversión de 5.06 años, un valor presente neto positivo y la posibilidad de generar ingresos adicionales por la venta de excedentes; aunque la hidroeléctrica es viable, su costo inicial, más gastos de operación y mantenimiento, la hacen menos competitiva.

Trabajar con energías renovables no solo es una necesidad ambiental urgente, sino también una oportunidad para el desarrollo social y económico. A medida que avanzamos hacia un futuro más sostenible, la transición hacia las energías renovables se presenta como una solución integral que aborda simultáneamente los desafíos ambientales y sociales de nuestro tiempo. La inversión en este sector no solo beneficia al medio ambiente, sino que también crea empleos, fomenta la innovación y mejora la calidad de vida de las comunidades en todo el mundo.

El análisis realizado demuestra que, para un proyecto de esta magnitud, es más rentable ajustar la generación de energía al consumo específico de la truchera. Los resultados indican que el costo de producción de 1 kWh in situ supera el precio de compra ofrecido por el operador de red, lo que hace preferible una estrategia de generación optimizada y ajustada a la demanda.

11 Referencias

- Bian, X., Tan, L., & Liu, N. (2023). Energy Optimization of Microgrids Based on Electricity-Carbon-Green Certificate Synergy. *2023 8th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, 987-992.
<https://doi.org/10.1109/ICPRE59655.2023.10353711>
- Santos, L. H. S., Silva, J. A. A., Lopez, J. C., Arias, N. B., Rider, M. J., & Da Silva, L. C. P. (2021). Integrated Optimal Sizing and Dispatch Strategy for Microgrids Using HOMER Pro. *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, 1-5.
<https://doi.org/10.1109/ISGTLatinAmerica52371.2021.9543015>
- Halmous, A., Oubbati, Y., & Lahdeb, M. (2024). Techno-Economic Study of Grid-Connected Hybrid Renewable Energy Systems Optimized by HOMER Pro. *2024 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICEEAC61226.2024.10576327>
- Iñiguez, J. C. T., Gutierrez, D. E. G., & Jimenez, A. D. U. (2022). “Diseño y construcción de una picocentral hidroeléctrica para la finca «la esperanza» - cantón zamora”: “Design and building of a pico-hydropower for the farm «la esperanza» - canton zamora”. *South Florida Journal of Development*, 3(4), 5420-5433.
<https://doi.org/10.46932/sfjdv3n4-106>
- Pesantez, J.-P., Ríos-Villacorta, A., & González-Redrován, J. (2021). Integración de Sistemas Solares Fotovoltaicos en el Sector Camaronero Intensivo y Extensivo del Ecuador: Caso de Estudio en la Provincia de El Oro. *Revista Politécnica*, 47(2), 7-16.
<https://doi.org/10.33333/rp.vol47n2.01>
- Islam, Md., Akter, H., Howlader, H., & Senjyu, T. (2022). Optimal Sizing and Techno-Economic Analysis of Grid-Independent Hybrid Energy System for Sustained Rural Electrification in Developing Countries: A Case Study in Bangladesh. *Energies*, 15(17), 6381. <https://doi.org/10.3390/en15176381>
- Jin, S., Kim, H., Kim, T. H., Shin, H., Kwag, K., & Kim, W. (2018). A Study on Designing Off-grid System Using HOMER Pro—A Case Study. *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 1851-1855. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2018.8607423>
- Islam, Md. K., Akanto, J. M., Zeyad, M., & Ahmed, S. M. M. (2021). Optimization of Microgrid System for Community Electrification by using HOMER Pro. *2021 IEEE 9th Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*, 01-05.
<https://doi.org/10.1109/R10-HTC53172.2021.9641615>
- González, E., Gualotuña, D., & Quinteros Flores, J. F. (2022). Diseño de una Micro-Red óptima mediante el uso del recurso solar fotovoltaico en la Universidad Politécnica Salesiana – Campus Sur, utilizando el software HOMER Pro. *I+D Tecnológico*, 18(2), 109-123. <https://doi.org/10.33412/idt.v18.2.3647>

- Boqtob, O., El Moussaoui, H., El Markhi, H., & Lamhamdi, T. (2019). Optimal sizing of grid connected microgrid in Morocco using HOMER Pro. *2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/WITS.2019.8723790>
- Mitsumori, Y. (2022). An Analysis on Impacts of Small-Scale Hydropower Plants Utilizing Water Supply System: Potential Socioeconomic Impacts on the Local Community. *2022 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*, 1-7. <https://doi.org/10.23919/PICMET53225.2022.9882855>
- Ahirwar, P., Kori, A. K., & Kapoor, S. (2021). Pre-Installation Analysis via “PVsyst” & “HOMER Pro” to Design & Simulate a 50kWp Solar Grid-Tied PV System for Rural Area Electrification, India. *2021 5th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECCOT)*, 388-394. <https://doi.org/10.1109/ICEECCOT52851.2021.9708056>
- Nugraha, D. A., Dewi, T., & Bow, Y. (2023). The Concept of Energy Generation by Solar Panel and Pico Hydro in Household Application. *2023 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT)*, 31-35. <https://doi.org/10.1109/IEIT59852.2023.10335531>
- Sepúlveda, W. C., Pineda, M. G. G., & Mora, S. B. S. (2018). Análisis estadístico de la radiación solar en la ciudad de Cúcuta. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 12(23), Article 23. <https://doi.org/10.31908/19098367.3698>
- ¿Qué es un sistema fotovoltaico y cómo funciona? (s. f.). Enel X. Recuperado 20 de octubre de 2024, de <https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/how-does-a-photovoltaic-system-work>
- Cómo llevar un correcto Mantenimiento de Baterías Solares. (s. f.). Recuperado 20 de octubre de 2024, de <https://energcitysa.com/blog/como-llevar-un-correcto-mantenimiento-de-baterias-solares>
- /

5 avances. (2020, marzo 2). 5 avances tecnológicos en energía solar fotovoltaica que cambiarán las reglas del juego. *Trace Software Spain*.

<https://www.trace-software.com/es/5-avances-tecnologicos-en-energia-solar-fotovoltaica/>

Abella, M. A. (2023). *Departamento de Energías Renovables Laboratorio de Energía Solar Fotovoltaica (PVLabDER - CIEMAT) Avda. Complutense, 22—MADRID 28040*.

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/38373658/SISTEMAS_FOTOVOLTAICOS-libre.pdf?1438653204=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSistemas_fotovoltaicos_Sistemas_Fotovolt.pdf&Expires=1699583854&Signature=PtuXwnmriPvw10Ps0eaws0di1YdS32JBiUDCYLvQYfYYJWSPCdCsID46xq7rbZDPxB2QHbkznlbpre~3daTxxUgA0TbByTIWTUNB0LbLa5BHAvQ2pv10VX0y~7ToAdY3JcTaHWDDv7aKUwN Cr3b5JyCTJkEVblDGffzTTuErEj0S2QqPExyQztZQYr~pbv14e1CSmmwSSqiIwReHh bhfQ2-OyG9IPJ1s7rctzRbecmCL9TTAgWFVe43zwTt3mdGttfj3B7WwuTBGCYbKVgl ZJbfKODefr8IVTLtlBOb9xDUAGWufi5xm0Ij2BRNUUhvrdhe1R2pKQwqMTaYimRH aA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

Actualidad, S. energético C. (2023). *Actualidad del sector energético colombiano*.

https://investigaciones.corficolombiana.com/analisis-sectorial-y-sostenibilidad/perspectiva-sectorial-energia/actualidad-del-sector-energetico-colombiano/informe_1290865

Ahirwar, P., Kori, A. K., & Kapoor, S. (2021). Pre-Installation Analysis via “PVsyst” & “HOMER Pro” to Design & Simulate a 50kWp Solar Grid-Tied PV System for Rural Area Electrification, India. *2021 5th International Conference on Electrical, Electronics,*

- Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECCOT)*, 388-394. <https://doi.org/10.1109/ICEECCOT52851.2021.9708056>
- Autosolar. (2023). *Autosolar | La Tienda de la Energía Solar*. <https://autosolar.co/>
- Autosolar | La Tienda de la Energía Solar*. (s. f.). Recuperado 20 de octubre de 2024, de <https://autosolar.co>
- Ayadi, F., Colak, I., Garip, I., & Bulbul, H. I. (2020). Targets of Countries in Renewable Energy. *2020 9th International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, 394-398. <https://doi.org/10.1109/ICRERA49962.2020.9242765>
- Bian, X., Tan, L., & Liu, N. (2023). Energy Optimization of Microgrids Based on Electricity-Carbon-Green Certificate Synergy. *2023 8th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, 987-992. <https://doi.org/10.1109/ICPRE59655.2023.10353711>
- BIPV. (2023). *Protección solar BIPV - Paneles solares individuales que se integran arquitectónicamente en los edificios*. https://www.solarnova.de/es/bipv_protecci%C3%B3n_solar.html
- Boqtob, O., El Moussaoui, H., El Markhi, H., & Lamhamdi, T. (2019). Optimal sizing of grid connected microgrid in Morocco using Homer Pro. *2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/WITS.2019.8723790>
- Contreras, W., Galban, M. G., Sepúlveda, S. B., Contreras, W., Galban, M. G., & Sepúlveda, S. B. (2018). Análisis estadístico de la radiación solar en la ciudad de Cúcuta. *Entre Ciencia*

e Ingeniería, 12(23), 16-22. <https://doi.org/10.31908/19098367.3698>

Culpatán, E. E. L. (2019). *Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica*.

DANE - INDICADORES ECONÓMICOS. (s. f.). Recuperado 20 de octubre de 2024, de <https://www.dane.gov.co/index.php/indicadores-economicos>

ENEL X. (2023). *¿Qué es un sistema fotovoltaico y cómo funciona? | Enel X*.

<https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/how-does-a-photovoltaic-system-work>

Enercity, E. (2020, abril 22). *Cómo llevar un correcto Mantenimiento de Baterías Solares*.

Enercity S.A.

<https://enercitysa.com/blog/como-llevar-un-correcto-mantenimiento-de-baterias-solares/>

EPM. (2023). *Diccionario de servicios públicos*.

<https://cu.epm.com.co/institucional/sobre-epm/quienes-somos/diccionario-de-servicios-publicos#A-330>

Fotovoltaico. (2023). *¿Cómo se puede optimizar el rendimiento de un sistema fotovoltaico?*

<https://comercialfoisa.com/como-se-puede-optimizar-el-rendimiento-de-un-sistema-fotovoltaico/>

Global Solar Atlas. (2024). <https://globalsolaratlas.info/map>

González, E., Gualotuña, D., & Quinteros Flores, J. F. (2022). Diseño de una Micro-Red óptima mediante el uso del recurso solar fotovoltaico en la Universidad Politécnica Salesiana – Campus Sur, utilizando el software HOMER PRO. *I+D Tecnológico*, 18(2), 109-123.

<https://doi.org/10.33412/idt.v18.2.3647>

Grigorash, O. V., Dvorny, V. V., & Pigarev, K. V. (2019). Power Supply of Agricultural Facilities of Krasnodar Territory Through Use of Renewable Energy. *2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 1-6.
<https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8742932>

Halmous, A., Oubbati, Y., & Lahdeb, M. (2024). Techno-Economic Study of Grid-Connected Hybrid Renewable Energy Systems Optimized by Homer Pro. *2024 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC)*, 1-6.
<https://doi.org/10.1109/ICEEAC61226.2024.10576327>

Homer Pro. (2023). *HOMER Pro—Microgrid Software for Designing Optimized Hybrid Microgrids*. <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>

Hot Item. (2023). *[Hot Item] Turbina Hidráulica Tipo Kaplan/tipo de Hélice*.

Made-in-China.com.

https://es.made-in-china.com/co_eternoo/product_AC-Three-Phase-100kw-30MW-Low-Head-Kaplan-Hydro-Turbine_hrhygiouy.html

Hu, H., Sun, F., Guo, W., & Wang, L. (2021). Net-Zero Carbon Intelligent Energy System based on Multiple Energy Integration. *2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 734-738.
<https://doi.org/10.1109/EI252483.2021.9713288>

Iñiguez, J. C. T., Gutierrez, D. E. G., & Jimenez, A. D. U. (2022). “Diseño y construcción de una picocentral hidroeléctrica para la finca «la esperanza» - cantón zamora”: “Design and

- building of a pico-hydropower for the farm «la esperanza» - canton zamora”. *South Florida Journal of Development*, 3(4), 5420-5433. <https://doi.org/10.46932/sfjdv3n4-106>
- Islam, Md., Akter, H., Howlader, H., & Senjyu, T. (2022). Optimal Sizing and Techno-Economic Analysis of Grid-Independent Hybrid Energy System for Sustained Rural Electrification in Developing Countries: A Case Study in Bangladesh. *Energies*, 15(17), 6381. <https://doi.org/10.3390/en15176381>
- Islam, Md. K., Akanto, J. M., Zeyad, M., & Ahmed, S. M. M. (2021). Optimization of Microgrid System for Community Electrification by using HOMER Pro. *2021 IEEE 9th Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*, 01-05. <https://doi.org/10.1109/R10-HTC53172.2021.9641615>
- Jacob, R. T., & Liyanapathirana, R. (2018). Technical Feasibility in Reaching Renewable Energy Targets; Case Study on Australia. *2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, 630-634. <https://doi.org/10.1109/ICEES.2018.8443251>
- Jin, S., Kim, H., Kim, T. H., Shin, H., Kwag, K., & Kim, W. (2018). A Study on Designing Off-grid System Using HOMER Pro—A Case Study. *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 1851-1855. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2018.8607423>
- Jung, D., Chang, Y., & Kim, Y.-M. (2018). Smart Micro Energy Grid—Service, Solutions, and Business Models. *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 1555-1558. <https://doi.org/10.1109/ICTC.2018.8539534>

LayF, J., & Bracco, I. R. (s. f.). *TP N°1: ECUACIÓN DE BERNOULLI*.

Li, Y., Chi, Y., Tian, X., Liu, C., Hu, J., Fan, Y., Fan, X., Xiao, Y., & Wang, C. (2020). Research on Capacity Planning of Renewable Energy Grid Integration Based on Effective Short Circuit Ratio. *2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, 622-627.
<https://doi.org/10.1109/iSPEC50848.2020.9351108>

Llangato, A. O., Allendes, J. P., & Bopp, M. A. J. (2023). *MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL*.

<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/170198/analisis-de-los-factores-tecnicos-que-inciden-en-la-constructibilidad-de.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

L.R, E. L. R. (2023). *Se espera que Colombia aumente capacidad de generar energía 18% por año*. Diario La República.

<https://www.larepublica.co/economia/se-espera-colombia-aumente-la-capacidad-de-generar-energia-18-anual-hasta-2037-3687466>

Martínez, S. M. (2023). *DISEÑO DEL SISTEMA ELECTROMECAÁNICO PARA UNA HIDROELÉCTRICA DE PEQUEÑA ESCALA: CASO TRUCHERA LA TULIA, JARDÍN, ANTIOQUIA MODALIDAD: PROFESIONAL*.

<https://repository.eia.edu.co/server/api/core/bitstreams/8bb38815-ecfb-4208-83b7-a08bbfa74a63/content>

Medidor. (2023). Medidor Bidireccional 3f Iskra. *Interelectricos Group S.A.S.*

<https://interelectricos.com/producto/medidor-bidireccional-3f-iskra/>

Millán, D. A. B., & Calderón, J. S. U. (2023). *Cauce de una quebrada para la energización de*

un galpón ubicado en Pore,.

[http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/8274/3/2023_DidierAntonioBernalMil%
l%c3%a1n.pdf](http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/8274/3/2023_DidierAntonioBernalMil%c3%a1n.pdf)

Mitsumori, Y. (2022). An Analysis on Impacts of Small-Scale Hydropower Plants Utilizing Water Supply System: Potential Socioeconomic Impacts on the Local Community. *2022 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*, 1-7. <https://doi.org/10.23919/PICMET53225.2022.9882855>

NASA. (2022, diciembre 7). <https://www.nasa.gov/>

Neska, E., Kowalska-Pyzalska, A., & Bielecki, M. (2024). Preferred Configurations of Renewable Energy Communities: Insights from In-Depth Interviews. *2024 20th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/EEM60825.2024.10608976>

Nugraha, D. A., Dewi, T., & Bow, Y. (2023). The Concept of Energy Generation by Solar Panel and Pico Hydro in Household Application. *2023 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT)*, 31-35. <https://doi.org/10.1109/IEIT59852.2023.10335531>

orsonz. (2021, noviembre 26). Catálogo de regulador solar. *Guangdong Prostar New Energy Technology Co., Ltd.* <https://www.prostarsolar.net/es/catalogo-de-regulador-solar.html>

Ortiz Flórez, R. (2011). *Pequeñas centrales hidroeléctricas* (Primera edición). Ediciones de la U. www.edicionesdelau.com

Patil, A., Mamatha, G., Kulkarni, P. S., & Verma, A. (2022). Analysis of Hybrid Floating

- Photovoltaic and Hydro-Power plant with HOMER Pro Software. *2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/PEDES56012.2022.10080502>
- Pelton. (2023). *Control de velocidad en turbinas hidráulicas PELTON por el deflector en transitorios*.
<https://es.linkedin.com/pulse/control-de-velocidad-turbinas-hidr%C3%A1ulicas-pelton-por-el-thiago-kleis>
- PowerSpout. (2023). *Low Head (LH) Info*. PowerSpout.
<https://www.powerspout.com/pages/low-head-lh-info>
- PowerSpout—Home Scale Micro Hydro*. (2024). PowerSpout. <https://www.powerspout.com/>
- Proyectos. (2021). *¿Qué son los proyectos On Grid y Off Grid? - Solcor Chile*.
<https://solcorchile.com/on-grid-off-grid/>
- Quinteros Flores, J. F., Yáñez, S. F., Mendoza, G. A., & Vaca, E. A. (2023). Diseño óptimo de una micro-red para maximizar la generación de potencia eléctrica en Paragachi y Wildtecsa modelado en Homer Pro. *I+D Tecnológico*, 19(2), 5-14.
<https://doi.org/10.33412/idt.v19.2.3753>
- Redes Energía*. (2024).
<https://grupoepm.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=d001d3aa7aeb4679a6f1d2fea1c2119c>
- Rincón S, R. A., & Vera S, S. P. (2019). *Diseño de un prototipo de sistema integrado de generación eléctrica, basado en energía renovable para la agroindustria en norte de*

Santander en fincas que consumen hasta 50 kw.

<http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/17628>

Ropa. (2023). *Ropa que convierte la luz en energía.*

<https://ecologismos.com/ropa-que-convierte-la-luz-en-energia/>

Santos, L. H. S., Silva, J. A. A., Lopez, J. C., Arias, N. B., Rider, M. J., & Da Silva, L. C. P.

(2021). Integrated Optimal Sizing and Dispatch Strategy for Microgrids Using HOMER Pro. *2021 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, 1-5.

<https://doi.org/10.1109/ISGTLatinAmerica52371.2021.9543015>

SIG CREG030—ETER. (2024). <https://maps.epm.com.co/ETER/visor/visor>

Solar Energy Calculator and Mapping Tool—PVGIS. (2024). <https://pvgis.com>

Thi Thu, H. N., Minh, P. V., Quang, S. L., Xuan, D. D., & Xuan, V. N. (2023). Simulation

Research to Optimize the Use of Renewable Energy in Agricultural Farms: Case Study in Vietnam. *2023 Asia Meeting on Environment and Electrical Engineering (EEE-AM)*, 01-05. <https://doi.org/10.1109/EEE-AM58328.2023.10394845>

Varas, P., Tironi, M., Rudnick, H., & Rodriguez, N. (2013). Latin America Goes Electric: The

Growing Social Challenges of Hydroelectric Development. *IEEE Power and Energy Magazine*, 11(3), 66-75. <https://doi.org/10.1109/MPE.2013.2245586>

Wikipedia. (2023). Turbina Turgo. En *Wikipedia, la enciclopedia libre.*

https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Turbina_Turgo&oldid=150086575

XM. (2023). *Glosario.* Portal XM. https://www.xm.com.coPortal_XM

12 Anexos

A continuación se presenta la lista de anexos del proyecto de grado.

[Anexo 1. Simulación de comportamiento de la red](#)

[Anexo 2. Escriba aquí y conserve el formato.](#)

[Anexo 3. Simulación del comportamiento de un sistema fotovoltaico, hidráulico y red con respecto a solo red](#)

[Anexo 4. Simulación del comportamiento de un sistema hidráulico y red con respecto a solo red](#)

[Anexo 5. Simulación optimizando el comportamiento de un sistema fotovoltaico y red con respecto a solo red](#)

[Anexo 6. Fotografías del proyecto](#)