



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología

PROPUESTA DE UN SISTEMA DE BOMBEO SOLAR FOTOVOLTAICO PARA USO AGRÍCOLA Y DOMÉSTICO EN LA VEREDA DOCHE (HUILA)

Presentado para obtener el título de

MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Alejandro García Murcia

Dirección:

Jesús Antonio Vega Uribe, Ingeniero Electricista, MSc.

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energías Renovables

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco profundamente al ingeniero ambiental Stiven Opina Pisso, por mostrarme y permitirme conocer la vereda Doche. Gracias por su guía y toda su ayuda en pro de servir a la comunidad y el desarrollo de este trabajo de grado, este proyecto no hubiera sido posible sin su apoyo.

Agradezco de corazón a Lina Marcela Rodríguez Puentes, por su apoyo inmensurable en todo el desarrollo del postgrado en Energías Renovables, gracias a su ayuda activa en cada uno de mis pasos.

Agradezco a la Universidad del Rosario por su apoyo académico y al tutor Jesús Antonio Vega Uribe por su profesionalismo y conocimiento que ayudaron al desarrollo de este trabajo de grado.

RESUMEN

Al ser Colombia un país en desarrollo, aun no garantiza el suministro de agua potable a toda la población, siendo principalmente las áreas rurales las menos priorizadas. Este es el caso de la vereda Doche, ubicada al norte del municipio de Villavieja en el departamento del Huila, conformada por aproximadamente treinta familias, las cuales no cuentan con el total de los servicios básicos de saneamiento y presentan dificultades en la consecución de agua para ampliar la frontera agrícola, principalmente para cultivos de cacao y frutales. En la actualidad el suministro de agua para riego se realiza por gravedad, lo que impide ampliar la frontera agrícola en 90 hectáreas disponibles, sumado a los altos costos en los que incurre cada familia para transportar el fluido a través de motobombas que funcionan con combustibles fósiles desde el distrito de riego a su respectivo tanque de almacenamiento para uso doméstico.

Para el desarrollo del proyecto se plantea dar solución al recurso hídrico mediante un sistema hidráulico de bombeo con energía solar fotovoltaica, el cual busca llevar el agua desde el canal de riego del río Cabrera hasta un único reservorio, que suministre el recurso hídrico total para irrigar 90 hectáreas de tierras productivas y de uso doméstico. Para ello se analiza la demanda hídrica de cultivos en el área potencialmente productiva y de la población con el fin de calcular el total del recurso hídrico para el posterior dimensionamiento del sistema hidráulico, calculando la demanda energética y diseñando el sistema solar fotovoltaico. Con esta propuesta se busca ampliar el sistema de riego actual que permita cubrir las necesidades de ampliación agrícola y reemplazar el sistema de uso doméstico, de igual forma se espera minimizar el impacto ambiental y mejorar las condiciones de vida de la población mediante un proyecto de desarrollo sostenible.

ABSTRACT

As Colombia is a developing country it still does not guarantee the supply of drinking water to the entire population, with rural areas being the least prioritized. This is the case of the Doche village, located in the north of the municipality of Villavieja in the department of Huila, composed of approximately thirty families, which do not have all the basic sanitation services and have difficulties in obtaining water to expand the agricultural frontier, mainly for cocoa and fruit crops. Nowadays, irrigation water is supplied by gravity, which impedes the expansion of the agricultural frontier by 90 available acres, in addition to the high costs incurred by each family in transporting the fluid from the irrigation district to its respective storage tank for domestic use by means of motor pumps that run on fossil fuels.

The project is proposed to provide a solution to the water resource through a hydraulic pumping system with photovoltaic solar energy, which seeks to bring water from the irrigation canal of the Cabrera River to a single reservoir, which supplies the total water resource to irrigate 90 acres of productive land and domestic use. For this purpose, the water demand of crops in the potentially productive area and for the population is analyzed in order to calculate the total water resource for the subsequent sizing of the hydraulic system, calculating the energy demand and designing the solar photovoltaic system. This proposal is intended to expand the current irrigation system to cover the needs of agricultural expansion and replace the domestic use system, as well as to minimize the environmental impact and improve the living conditions of the population through a sustainable development project.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| Capítulo 1..... | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Capítulo 2 OBJETIVOS | 3 |
| 1.1 Objetivo general..... | 3 |
| 1.2 Objetivos específicos | 3 |
| Capítulo 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN..... | 4 |
| Capítulo 4..... | 8 |
| MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE..... | 8 |
| Capítulo 5..... | 12 |
| METODOLOGIA..... | 12 |
| Capítulo 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 19 |
| Capítulo 7 CONCLUSIONES | 41 |
| Referencias..... | 43 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Reporte de censos para la vereda Doche | 21 |
| Tabla 2. Dotación neta según el nivel de complejidad | 22 |
| Tabla 3. Demanda de agua de cultivos | 22 |
| Tabla 4. Demanda hídrica por semana..... | 23 |
| Tabla 5. Características principales de los arreglos fotovoltaicos simulados por PVsyst . | 33 |
| Tabla 6. Resultados de simulaciones PVsyst en función de la energía requerida por día . | 33 |
| Tabla 7. Costos iniciales del sistema solar fotovoltaico y obras civiles | 37 |
| Tabla 8. Costos iniciales y obras civiles del sistema hidráulico y reservorio..... | 37 |
| Tabla 9. Costo inicial y otros factores a tener en cuenta en la proyección económica | 38 |
| Tabla 10. Proyección de costos y ganancias de proyecto a 30 años | 39 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Localización del desde proyecto e identificación de la vereda Doche | 19 |
| Figura 2. Características generales del clima del municipio de Villavieja | 20 |
| Figura 3. Balance hídrico semanal para el reservorio | 24 |
| Figura 4. Sistema de bombeo y área de interés para la ampliación de la frontera agrícola | 25 |
| Figura 5. Altura de bombeo el punto de captación al reservorio | 26 |
| Figura 6. Diagrama del sistema de bombeo | 27 |
| Figura 7. Diagrama para la selección de bombas de 3500rpm HALBERG NOWA Bombas Centrífugas de Carcasa Espiral | 29 |
| Figura 8. Diagrama de irradiancia normal directa en Wh/m2 | 31 |
| Figura 9. Parámetros fijos utilizados en las simulaciones de PVsyst | 32 |
| Figura 10. Diagrama unifilar sistema 144KWp conectado a la red | 35 |
| Figura 11. Diagrama completo del proyecto definido por áreas..... | 35 |
| Figura 12. Diagrama económico costos y ganancias de proyecto a 30 años | 39 |

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La vereda Doche, ubicada en el municipio de Villavieja al norte del departamento del Huila y dentro del distrito regional de manejo integrado la Tatacoa, a la fecha no cuenta con servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado, aseo y distribución de gas combustible, que sumado al mal estado de las vías hacen que la población se encuentre en desigualdad social. Por tratarse de una zona rural aislada la comunidad actualmente cuenta con un abastecimiento intermitente y deficiente de agua no potable en la que cada familia debe bombear el recurso por medio de motobombas a combustibles fósiles desde el canal de riego a su respectivo tanque de almacenamiento plástico de 2000 litros o por recolección por precipitaciones para su posterior uso en actividades domésticas.

La comunidad cuenta con un distrito de riego del cual se abastece, éste es realizado por gravedad desde el río Cabrera con el que alcanza a irrigar 50 hectáreas que se encuentran por debajo de la curva de nivel, lo que equivale aproximadamente al 17% del total de suelo aprovechable en cultivos principalmente de cacao de alta calidad [1]. El recurso hídrico en la zona es de vital importancia debido a las altas temperaturas y extensos períodos de sequía en el territorio del desierto de la Tatacoa, lo que dificulta la obtención del recurso hídrico y sustenta la importancia para la comunidad de implementar este proyecto.

Al incorporar un sistema de bombeo solar fotovoltaico con capacidad de elevar el agua para ser almacenada en un único reservorio principal, se espera suplir la totalidad de la demanda hídrica para uso doméstico y a su vez ampliar la frontera agrícola en 90 hectáreas de tierras cultivables, lo que permite mantener los niveles del tanque de agua durante las horas del día y un reservorio para las horas de la noche, el reservorio se ubicará en un punto elevado cercano al cultivable, lo que mejora las condiciones de vida de las 30 familias que habitan la zona mediante un proceso de crecimiento integrado, económico y autosostenible que favorece el medio ambiente por la disminución de gases de efecto

invernadero al suprimir combustibles fósiles, además de ser sistemas de bombeo silenciosos y tener baja frecuencia de mantenimientos y larga vida útil (20 años) [2].

Existen estudios en la región de Mozambique en el continente africano que muestran cómo la comunidad se benefició de sistemas fotovoltaicos de bombeo de agua para riego de cultivos hortícolas [3]. Así mismo, en el distrito suroeste de Aceh, Indonesia en donde la implementación de un sistema de bombeo fotovoltaico ayudó a la comunidad a mejorar la calidad de vida de la población mediante el diseño un sistema de bombeo de agua de aljibe con energía solar fotovoltaica para aumentar el nivel de los servicios de agua potable [4].

La estructura de este documento se encuentra organizada de tal manera que sea de fácil entendimiento mediante una propuesta que diseña un sistema hidráulico de bombeo con energía solar fotovoltaica basado en la demanda hídrica estimada para uso doméstico y agrícola en la vereda Doche, objetivo principal de la presente investigación. La metodología realizada para este proyecto consta de cuatro etapas; la primera etapa se centra en el cálculo de la demanda hídrica para diferentes usos, la segunda está comprendida por el diseño del sistema hidráulico y cálculo de potencia, la tercera diseña el sistema solar fotovoltaico y la cuarta etapa analiza la viabilidad económica de todo el diseño.

Capítulo 2

OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Diseñar un sistema hidráulico de bombeo con energía solar fotovoltaica basado en la demanda hídrica estimada para uso doméstico y agrícola en la vereda Doche.

1.2 Objetivos específicos

Estimar el recurso hídrico necesario para suplir la demanda de uso doméstico de la comunidad y para el riego de los cultivos agrícolas propios de la vereda.

Realizar el dimensionamiento del sistema de bombeo para la distribución desde el canal de riego hasta el sistema de almacenamiento.

Diseñar el sistema solar fotovoltaico para satisfacer las necesidades energéticas del sistema de bombeo hidráulico.

Estimar la viabilidad económica del proyecto y factibilidad de desarrollo en la vereda Doche.

Capítulo 3

PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En el mundo, según la Organización de Naciones Unidas (ONU), tres de cada 10 personas carecen de acceso a servicios de agua potable seguros, seis de cada 10 carecen de acceso a instalaciones de saneamiento gestionadas de forma segura; además, aproximadamente el 70% de todas las aguas extraídas de los ríos, lagos y acuíferos se utilizan para riego [5]. La constitución política de Colombia (1991), establece en su artículo 49 que el agua es un derecho fundamental para uso personal y doméstico, destinado a satisfacer las necesidades básicas y estará regulada bajo parámetros de cantidad, disponibilidad, calidad, accesibilidad y asequibilidad, así como para el aprovechamiento por concesión para fines productivos. Sin embargo, muchas de las zonas rurales carecen de la disponibilidad y tecnología apropiada para el aprovechamiento del agua.

Este es el caso de la vereda Doche, ubicada en el municipio de Villavieja al norte del departamento del Huila y dentro del distrito regional de manejo integrado la Tatacoa, que en la actualidad no cuenta con servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado, aseo y distribución de gas combustible, sumado a la ausencia del Estado Colombiano, las malas vías hacen que la población se encuentre en desigualdad social. Por tratarse de una zona rural aislada la comunidad actualmente tiene un abastecimiento intermitente y deficiente de agua no potable en la que cada familia debe bombear el recurso desde el canal de riego a su respectivo tanque de almacenamiento plástico de 2.000 litros o por recolección por precipitaciones para su posterior uso en actividades domésticas.

Este proceso lo realizan con la ayuda de aproximadamente 20 motobombas que funcionan con combustible de ACPM o gasolina, ubicadas en distintos puntos del canal de riego para bombear el agua a diferentes puntos de almacenamiento. En la actualidad estas motobombas permanecen encendidas aproximadamente 15 horas semanales, situación medioambientalmente y económicamente insostenible debido a los altos costos en combustible, mantenimiento y reparación que equivalen aproximadamente a 480.000 pesos

anuales por familia sin obtener a cambio un servicio permanente, confiable y de calidad, sumado a las emisiones de gases de invernadero y contaminación auditiva [6].

La vereda se encuentra conformada por 30 familias que hacen parte de la junta de acción comunal Doche, que a su vez se subdividen en ASODOCHE, asociación para el distrito de riego que bajo la resolución 300 del primero de abril de 1996 por el INCORA, conocido hoy en día como la Agencia de Desarrollo Rural (ADR), se subdividió en 30 parcelas en franjas con áreas equitativas y distinta vocación de uso; entre las cuales están divididas por zonas de aprovechamiento agropecuario, conservación, asentamiento de infraestructura de vivienda y urbanización.

La comunidad cuenta con un distrito de riego del cual se abastece, éste es realizado por gravedad desde el río Cabrera y en la actualidad se redujo su concesión a 40 L/s por no contar con una capacidad de riego superior. El distrito de riego alcanza a irrigar 50 hectáreas por gravedad que se encuentran por debajo de la curva de nivel, lo que equivale aproximadamente al 17% del total de suelo aprovechable en cultivos principalmente de plátano, banano, limón y cacao [1], este último condecorado con el primer lugar del concurso departamental de calidad “Cacao selecto del Huila” realizado en septiembre del 2023 [7] por su alta calidad de aroma, sabor y ausencia de metales pesados, una exigencia cada vez más frecuente a la hora de vender en mercados internacionales en especial a destinos europeos como Suiza, Países Bajos, Alemania e Italia, que lo utilizan en chocolatería fina y otros procesos [8].

La comunidad no cuenta con los medios para abastecer de agua los predios ubicados por encima del canal de riego existente, sumado a esto las altas temperaturas y extensos períodos de sequía en la zona del desierto de la Tatacoa, dificulta la obtención del recurso hídrico, en mayor medida por falta de tecnologías que faciliten los procesos de producción agrícolas, de los cuales obtienen la mayor parte de los alimentos e ingresos económicos para la subsistencia de la comunidad de la vereda Doche.

El acceso al recurso hídrico en la zona es de vital importancia, ya que en la actualidad se dificulta por los altos costos e ineficiencia del sistema de bombeo convencional que utiliza combustibles fósiles para captar el caudal necesario para el uso doméstico y para la ampliación de la frontera agrícola. Vale la pena mencionar que el funcionamiento de las motobombas diésel o gasolina actualmente utilizadas, generan contaminación por ruido, humo y gases de efecto invernadero que se producen por el uso de combustibles fósiles y altos costos de mantenimiento con corta vida útil que equivalen a 480.000 pesos por familia solo para uso doméstico [2].

La vereda Doche se ubica en un ecosistema con características de bosque seco tropical, razón por la que el presente proyecto se hace atractivo y viable para generar energía eléctrica por medio de la energía solar, esto se justifica con la última subasta de obligaciones de energía firme OEF 2027 y 2028, enfocada en incentivar la generación de energías renovables y fortalecer los parques solares y eólicos, en donde se instalará una primera planta de energía solar fotovoltaica con capacidad instalada de 200MW en el municipio de Villavieja [9].

Al incorporar un sistema de bombeo solar fotovoltaico con capacidad de elevar el agua para ser almacenada en un único reservorio principal, se espera suplir la totalidad de la demanda hídrica para uso doméstico y a su vez ampliar la frontera agrícola en 90 hectáreas de tierras cultivables de zonas alejadas, lo que permitirá mantener los niveles de agua durante las horas del día y reserva suficiente para las horas de la noche. El reservorio se ubica en un punto cercano al área cultivable, lo que mejora las condiciones de vida de las 30 familias mediante un proceso de crecimiento integrado, económico y autosostenible que favorece el medio ambiente por la disminución de gases de efecto invernadero, además de ser silenciosos y tener baja frecuencia de mantenimientos, así como larga vida útil (20 años) [2].

Por lo anterior, es necesario realizar el dimensionamiento de un sistema de bombeo solar fotovoltaico con capacidad suficiente para elevar el agua y almacenarla en un único reservorio, con el fin de suplir la totalidad de la demanda hídrica para uso doméstico y a su

vez para ampliar la frontera agrícola en 90 hectáreas de tierras cultivables para la comunidad de la vereda Doche.

Capítulo 4

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Para el desarrollo de este proyecto es necesario establecer como criterio una referenciación bibliográfica significativa que permita orientar el curso que tendrá este. Los estudios similares desarrollados tanto a nivel mundial como local sirven de orientación para ejecutar la propuesta de un sistema de bombeo solar fotovoltaico para uso agrícola y doméstico particularmente en la vereda Doche (Huila), iniciando con la referenciación de sistemas de bombes fotovoltaicos y cálculo de la demanda hídrica para diferentes usos. Esto permite definir el consumo de agua necesario para un periodo de tiempo además de simular el diseño de plantas de energía solar fotovoltaica (PV) mediante el programa PVsyst, lo que permite analizar la viabilidad económica y algunos estudios ambientales, terminado con ventajas y otros estudios similares a nivel de Colombia.

Para el desarrollo de esta propuesta se tuvieron en cuenta algunas investigaciones a nivel mundial, como la realizada por Chilundo, Neves y Uranio en el 2019 quienes establecen que en la región de Mozambique se diseñó un sistema solar fotovoltaico de bombeo de agua para riego de cultivos hortícolas, realizaron un análisis cualitativo de la demanda de agua de los cultivos, así mismo, presentaron avances y oportunidades en la adopción de sistemas de bombeo de agua fotovoltaico PVWPS (Photovoltaic Water Pumping System), explorando la mejor perspectiva de transición para las necesidades de la estrategia de energía verde de la región [3].

Del mismo modo Sariyusda en 2021, identificó que en el distrito suroeste de Aceh (Indonesia), se logró mejorar la calidad de vida de la población mediante el diseño de un sistema de bombeo de agua de aljibe con energía solar para aumentar el nivel de los servicios de agua potable, desde el nivel de servicio básico hasta el nivel de servicio medio. El análisis de diseño realizado incluyó la predicción de la población, la radiación solar y los requisitos de potencia de bombeo y energía fotovoltaica. Este análisis muestra que la necesidad de agua potable en la zona es de 27.828,96 litros/día y que el suministro de agua potable para 557 residentes requiere una potencia de bombeo de 1.750 W [4].

Cabe resaltar que los sistemas de bombeo solar fotovoltaico no son utilizados solamente para procesos de irrigación de cultivos y obtención de agua potable, también son utilizados en procesos de obtención de sal, los cuales fueron estudiados mediante indicadores de desarrollo personal y social (IDPs), realizando encuestas y visitas in situ para verificar la eficiencia de los sistemas de bombeo, viabilidad económica, disponibilidad, asequibilidad y beneficios a las comunidades. De modo que, el resultado de la investigación se centró en realizar una herramienta de software para el dimensionamiento y selección de los sistemas de bombeo [10]. De igual manera, otros estudios de sistemas de bombeo solar fotovoltaico se centraron en verificar el funcionamiento de éstas en condiciones reales, donde se concluyó que la potencia de salida promedio depende no solo de la irradiancia sino también del efecto combinado de todas las condiciones ambientales (parámetros climáticos, estado actual de la atmósfera, el aire y objetos circundantes, etc) [11].

Para entender cómo se dimensiona un sistema solar fotovoltaico, Aguaded en el 2018 en la provincia de Huelva (España), nos muestra cómo se diseñó un sistema solar fotovoltaico para una vivienda unifamiliar basado en el programa PVsyst, Con este dimensiona el tamaño de las instalaciones teniendo en cuenta la radiación solar que recibiría el sistema en función de su ubicación gracias a su base de datos meteorológica, definiendo el número de paneles, inclinación y número de baterías, así como inversores y reguladores de carga, por ultimo definiendo la arquitectura final del sistema a instalar [12].

La creciente demanda de sistemas de instalación de energía solar fotovoltaica (PV) como fuente de energía renovable requiere precisión para predecir la eficiencia del sistema. Belmahdia y Bouardia en 2019 utilizaron el programa de PVsyst para simular la energía solar producida para este fin y evaluar su desempeño, prediciendo la eficiencia de una planta fotovoltaica de 1 MW en el norte de Marruecos [13].

FangFang Wang et al, en 2024 simulan un sistema de generación de energía fotovoltaica con almacenamiento de 50 MW utilizando el programa de PVsyst. Basado en los resultados de la prueba de simulación de operación de PVsyst, se explora el rendimiento

operativo del sistema de generación de energía (fotovoltaico + almacenamiento de energía) de 50 MW. Los resultados muestran que el sistema puede lograr un funcionamiento estable las 24 horas, incluso cuando la luz del sol cambia significativamente o la demanda alcanza su punto máximo, mantiene el equilibrio del suministro de energía de la red y ahorra un total de 1.121.310 toneladas de Emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida del sistema [14].

Según lo mencionado por Hammad y Ebaid en 2015 [6], la viabilidad económica de los sistemas de bombeo fotovoltaico para 55 pozos de agua subterránea en Jordania, frente a otros tipos de tecnología como lo son electrógenos, sistemas de red, redes fotovoltaicas y grupos electrógenos fotovoltaicos, demuestra que el sistema solar fotovoltaico es el más rentable y adecuado sobre otros tipos convencionales de energía. Además se evaluaron la reducciones en las emisiones de CO₂, que equivalen aproximadamente a 30.000 toneladas anuales por pozo.

De la misma manera, Ayodele et al en 2018, presentaron un análisis detallado y completo de los beneficios técnicos, ambientales y económicos al proporcionar el suministro de agua mediante un sistema de bombeo fotovoltaico para tres mataderos seleccionados, en donde se cuantifico el requerimiento total de agua y carga eléctrica necesaria para dimensionar el sistema solar fotovoltaico, los resultados muestran que los costos promedio de energía equivalen a US\$0,20 y que con la implementación del proyecto se podría evitar en promedio 15.000 kg/año de dióxido de carbono [15].

En Colombia existen pocos estudios en el uso de las energías renovables para zonas no interconectadas en sistemas de bombeo, Casarrubia en 2021 realizó un análisis que corrobora el uso de energías renovables como alternativa sostenible de energía implementada para el uso de sistemas de bombeo de agua en zonas rurales no interconectadas del país, en la medida que se disminuyen impactos ambientales y se genera conciencia ambiental en la población. Este estudio fue realizado por la Universidad de Córdoba (Colombia), donde se pudo analizar la eficiencia del sistema de bombeo fotovoltaico en relación con el brillo solar y la potencia que genera la bomba para garantizar el sistema de bombeo de agua [16].

De la misma manera Peralta en 2011, presenta resultados a través de su investigación en el uso de la energía solar fotovoltaica y su incidencia en el desarrollo rural, en torno a características sociales, ambientales, económicas, políticas y geográficas, destacando la importancia del desarrollo sostenible de las comunidades no interconectadas, enfocada en el proceso de transformar la energía solar en energía eléctrica hacia sistemas de acumulación para ser aprovechada en viviendas rurales, centros de salud y escuelas para la iluminación, sistemas de bombeo de agua en pozos profundos, refrigeración de medicinas y telecomunicaciones. Este estudio se llevó a cabo en la vereda de Carupana, municipio de Tauramena, departamento de Casanare (Colombia) [17].

Capítulo 5

METODOLOGIA

Para la metodología de este proyecto se establecen cuatro etapas para alcanzar el objetivo propuesto de la presente investigación de forma organizada. La primera de estas se centrará en el cálculo de la demanda hídrica para diferentes usos, la segunda etapa estará comprendida por el diseño del sistema hidráulico, la tercera diseña el sistema solar fotovoltaico y la cuarta etapa analiza la viabilidad económica del diseño propuesto.

Etapa 1. Reconocimiento e identificación de condiciones socio demográficas de la población y cultivos para el cálculo de la demanda hídrica.

En esta etapa se pretende ubicar el proyecto espacialmente para lo que será necesario; realizar un reconocimiento detallado del área de interés mediante visita de campo, definir geográficamente con base a planos y mapas topográficos proporcionados por la comunidad y Google Earth la localización de cada uno de los componentes del proyecto a diseñar y consolidar toda la información en un archivo ilustrado por medio del programa topográfico ArcGIS en Google Earth.

ArcGIS se utiliza para mapas e información geográfica relacionada, se basa en un sistema de administración de contenido para información geográfica que permite compartir y habilitar numerosos tipos de aplicaciones basadas en SIG y sitios Web de usuarios finales. Para el estudio se realizan las curvas de nivel y generación del mapa topográfico en ArcGIS [18].

Una vez realizado el plano topográfico de la vereda, se procede a identificar las condiciones socio demográficas y realizar la proyección de la población a 20 años por medio del método aritmético propuesto en la guía RAS-001, soportado por censos realizados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) e informes existentes con el fin de estimar la población correspondiente a la proyectada al año de diseño del sistema, la ecuación 1 permite realizar el cálculo de la proyección de la población [19].

$$P_f = P_{uc} + \frac{P_{uc} - P_{ci}}{T_{uc} - T_{ci}} * (T_f - T_{uc}) \quad (1)$$

En donde,

P_f = Población (habitantes) correspondiente al año para el que se quiere proyectar la población.

P_{uc} = Población (habitantes) correspondiente al último año censado con información.

P_{ci} = Población (habitantes) correspondiente al censo inicial con información.

T_{uc} = Año correspondiente al último censo con información

T_{ci} = Año correspondiente al último censo inicial con información y

T_f = Año al cual se quiere proyectar la información

Con el cálculo de población proyectada se define la dotación neta por habitante y posterior demanda de agua del sistema de acueducto del centro poblado, según reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico establecido en la guía RAS-001, definición del nivel de complejidad y evaluación de la población, la dotación y demanda del agua [19].

$$d_{bruta} = \frac{d_{neta}}{1 - \%P} \quad (2)$$

En donde,

d_{bruta} = Cantidad de agua requerida por un habitante, considerando perdidas (LHD)

$\%P$ = Perdidas de agua en el sistema de acueducto

d_{neta} = Cantidad de agua que requiere un habitante (LHD)

Como siguiente paso se procede a realizar el balance hídrico y cálculo del máximo necesario de agua para el cultivo principalmente de cacao y árboles frutales en el área establecida de 90 hectáreas, basado en el programa de uso eficiente y ahorro de agua – PUEAA del distrito de riego de la vereda Doche de Villavieja (Huila), el cual establece los usos otorgados bajo la resolución 2644 del 09 de octubre de 2009 del uso del suelo [20] y requerimientos actuales de los productores agrícolas a fin de establecer la demanda hídrica total de los cultivos.

Después de obtenida la demanda de agua de la comunidad para uso doméstico y agrícola mediante los pasos descritos, se procede a la sumatoria de las demandas originadas por los diferentes usos que devengue el suministro por medio de una planeación semanal de riego que permita dimensionar tanto el tanque de almacenamiento como el sistema hidráulico de bombeo.

Etapa 2. Dimensionamiento del sistema hidráulico.

En esta etapa se establecen las características y dimensionamiento del sistema de transporte del agua, longitud de la tubería antes y después de la bomba, diámetros de tubería, caudal, materiales y accesorios desde el punto de captación hasta el sistema de almacenamiento. Con ayuda del mapa de relieve se establecen los puntos estratégicos en los cuales se ubicarán [21]; punto de captación, reservorio, líneas de tubería de succión y descarga y ubicación del sistema de bombeo.

Con las ubicaciones determinadas y las curvas de relieve se procede a determinar la potencia requerida en la bomba, mediante la ecuación general de la energía o ecuación de Bernoulli, utilizada en gran medida para resolver problemas hidráulicos entre dos puntos mediante la relación de presión, velocidad y altura del transporte de un fluido, evaluando las pérdidas por fricción en las líneas de tubería mediante la ecuación Darcy–Weisbach y las pérdidas localizadas en los accesorios [2].

La ecuación general de la energía o ecuación de Bernoulli se expresa de forma general de la siguiente manera:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + H_B - H_T = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_{f\ 1\rightarrow 2} + h_{L\ 1\rightarrow 2} \quad (3)$$

En donde,

P_{1-2} = Presión del fluido en un punto determinado.

V_{1-2} = velocidad del fluido en ese punto.

g = aceleración debido a la gravedad.

γ = Peso específico del agua

Z_{1-2} = Altura a la que se encuentra el punto con respecto a un nivel de referencia.

H_B = Energía añadida al fluido mediante un dispositivo mecánico como una bomba, conocida como cabeza suministrada por una bomba.

H_T = Energía removida o retirada del fluido mediante un dispositivo mecánico como podría ser el motor de fluido o una turbina, conocida como cabeza absorbida por una turbina.

$h_{f\ 1\rightarrow 2}$ = Pérdidas de energía por parte del sistema, debidas a fricción en los conductos.

$h_{L\ 1\rightarrow 2}$ = Pérdidas de energías menores debidas a la presencia de válvulas y conectores, conocidas como pérdidas localizadas.

La evaluación de las pérdidas de energía debido a la fricción se realiza por medio de la ecuación de Darcy–Weisbach, la cual permite calcular la pérdida de energía en secciones largas y rectas de conductos redondos, tanto para flujo laminar como turbulento:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

En donde,

L = Longitud del tubo o conducto (m)

D = diámetro interior del conducto (m)

V = velocidad promedio del flujo (m/s)

g = gravedad (m/s^2)

f = factor de fricción Darcy–Weisbach (Obtenido gráficamente)

Para evaluar las pérdidas proporcionales a la cabeza de velocidad del fluido al fluir alrededor de un codo, a través de una dilatación o contracción de la sección de flujo o de una válvula, los valores experimentales de pérdidas de energía se reportan en términos del coeficiente de resistencia K, calculadas por medio de la ecuación 5.

$$h_L = K * \left(\frac{V^2}{2 * g} \right) \quad (5)$$

En donde,

K = Coeficiente de resistencia o pérdida – Factor adimensional.

g = gravedad (m/s^2)

V = velocidad promedio del flujo en la vecindad donde se presenta la pérdida menor (m/s)

Una vez determinadas las siguientes características; cabezas (succión, descarga y total), pérdidas totales (friccionales y localizadas), capacidad (caudal), localización geográfica (Altura sobre el nivel del mar) del punto de captación y descarga, se recurre a las cartas gráficas de los fabricantes basados en los parámetros hidráulicos de potencia y caudal [22] para seleccionar el tipo de bomba y posterior cálculo del requerimiento energético.

Un parámetro importante para tener en cuenta es la cabeza neta de succión disponible (NPSH)_d, esta calcula la mínima diferencia entre la presión de succión y la presión de vapor del líquido, evitando que el líquido se evapore, en donde NPSHA debe ser mayor a NPSHR (altura de succión positiva neta en la que el rendimiento de la bomba se reduce en un 3% debido a la cavitación) para evitar el riesgo de cavitación¹, ésta se calcula mediante la ecuación 6.

$$NPSHA = P_s - P_{vap} + P_{atm} \quad (6)$$

En donde,

NPSHA= altura de succión positiva neta disponible en el puerto de entrada de la bomba, ft

P_s = presión en la succión (antes de la bomba), expresado en cabeza de presión, ft

P_{vap} = presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo, ft

Mediante la ecuación de Goff Gratch se calculará la presión de vapor necesaria en el cálculo de cavitación [23], relacionada en la ecuación 7.

¹ La cavitación es un fenómeno mediante el cual se producen burbujas de gas o vapor en un fluido a consecuencia de cambios en la presión o la temperatura. Cuando la presión interior de una tubería de agua disminuye por debajo de la presión atmosférica se produce un vacío. Cuanto mayor es el descenso de la presión, el vacío se incrementa [41].

$$\begin{aligned} \text{Log}_{10} P_{vap} = & -7.90298\left(\frac{373.16}{T} - 1\right) + 5.02808\text{Log}_{10}\left(\frac{373.16}{T}\right) - \\ & 1.3816 \times 10^{-7} \left(10^{11.344\left(1 - \frac{T}{373.16}\right)} - 1\right) + 8.1328 \times 10^{-3} \left(10^{-3.49149\left(\frac{373.16}{T} - 1\right)} - 1\right) + \\ & \text{Log}_{10}(1013.246) \end{aligned} \quad (7)$$

En donde,

P_{vap} = Presión de vapor de agua, hPa.

T = Temperatura del agua, K.

Para el cálculo de la presión barométrica, esta se realiza mediante la ecuación 8.

$$\text{Log}_{10} (P_{barometric}) = \frac{2.880814 - hel}{64790.7} \quad (8)$$

En donde,

$P_{barometric}$ = Presión barométrica en la superficie del agua, mm Hg

hel = Elevación sobre el nivel medio del mar, ft

Teniendo en cuenta la información recolectada se procede a ubicar en el mapa topográfico modelado con Google Earth realizado en la etapa 1, todo el dimensionamiento del sistema hidráulico con el tanque de almacenamiento y área cultivable beneficiada (90 hectáreas).

Etapa 3. Diseño del sistema solar Fotovoltaico.

Con la respectiva demanda de energía del sistema de bombeo identificada en la etapa anterior, se procede a la evaluación del recurso solar e irradiancia para la vereda Doche, esta se realizará mediante la página web de Global Solar Atlas, ya que proporciona acceso rápido y fácil a datos sobre recursos solares y potencial de energía fotovoltaica a nivel mundial [24] y el programa PVsyst versión 7.3, ampliamente utilizado para desarrollar instalaciones fotovoltaicas, permitiendo el estudio, la simulación y el análisis de datos completo. Con este software se dimensiona el tamaño de las instalaciones teniendo en cuenta la radiación solar que recibe en función de su ubicación gracias a su base de datos meteorológica [12], Estableciendo el tipo de panel, potencia, eficiencia, vida útil y número

de paneles solares y componentes como inversores para su posterior dimensionamiento y área total requerida.

Con el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico se procede a definir la arquitectura final del proyecto y su respectiva configuración, para esto se tendrá en cuenta la información recolectada en las etapas 2 y 3, que permite establecer el diagrama en el mapa topográfico y así contemplar el modelado del sistema hidráulico y del sistema solar fotovoltaico.

Etapa 4. Viabilidad económica.

Con el modelado completo del sistema de bombeo solar fotovoltaico, se procede al desarrollo de la viabilidad económica, para lo cual se establecen los costos iniciales de instalación; iniciando con el sistema hidráulico de tuberías, accesorios, sistema de bombeo y elaboración de reservorio, seguido del sistema solar fotovoltaico con paneles solares, inversores, controladores de carga, incluyendo costos de obra y permisos, costos de mantenimiento y costos de reacondicionamiento para todo el sistema [6].

Por último, se establece la vida útil del proyecto y el flujo de caja anual, llevando todos los costos al presente mediante la fórmula de valor presente neto [25], la cual sirve para amortizar (Nivelar) los costos a lo largo de la vida del proyecto, finalizando con determinar el retorno de la inversión inicial y posterior factibilidad de desarrollo en la vereda Doche, sin tener en cuenta factores como la productividad del área agrícola.

Capítulo 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Reconocimiento e identificación de condiciones socio demográficas de la población y cultivos para el cálculo de la demanda hídrica.

La vereda Doche está ubicada en el municipio de Villavieja, al norte del departamento del Huila. La ruta de ingreso inicia en el casco urbano del municipio de Villavieja recorriendo la ruta principal de ingreso al desierto de la Tatacoa, atravesando el desierto con dirección al río Cabrera a 25,1 km de recorrido. La organización comunitaria está ubicada sobre las coordenadas $3^{\circ}17'4.44''N$ y $75^{\circ}3'25.87''W$ como se muestra en la figura 1, en donde las franjas corresponden a las tierras otorgadas a cada familia de la vereda y el área roja al sitio de interés.

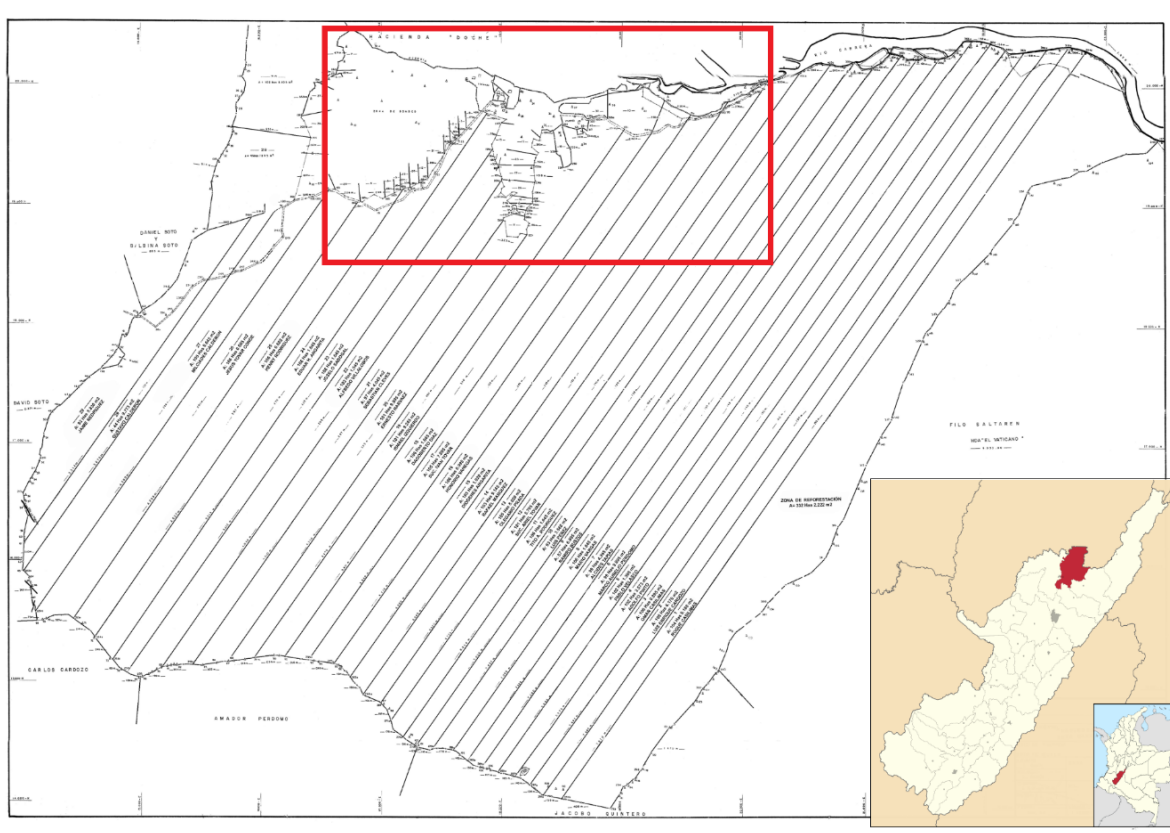


Figura 1. Localización del proyecto e identificación de la vereda Doche

El municipio más cercano a la vereda Doche es Villavieja (Huila), presentando un clima cálido – seco, el promedio de lluvia total anual es de 1.131 mm, distribuidas en dos periodos. La temporada seca principal tiene lugar en los meses de junio, julio, agosto y septiembre; una temporada seca adicional se presenta en los meses de enero y febrero, las temporadas de lluvia se extienden desde finales de marzo hasta mayo y desde finales de septiembre hasta principios de diciembre. En los meses secos, llueve de 9 a 11 días/mes y en los meses de mayores lluvias puede llover de 12 a 15 días/mes. La temperatura promedio es de 27.3 °C, al medio día la temperatura máxima media oscila entre 33 y 35°C y en la madrugada la temperatura mínima se puede encontrar entre 21 y 22°C. El sol brilla cerca de 4 horas diarias en los meses lluviosos, pero en los meses secos, la insolación está entre 5 y 6 horas diarias. La humedad relativa del aire oscila durante el año entre 58 y 73 %, siendo mayor en los meses de mayo y noviembre y menor en julio, agosto y septiembre [26].

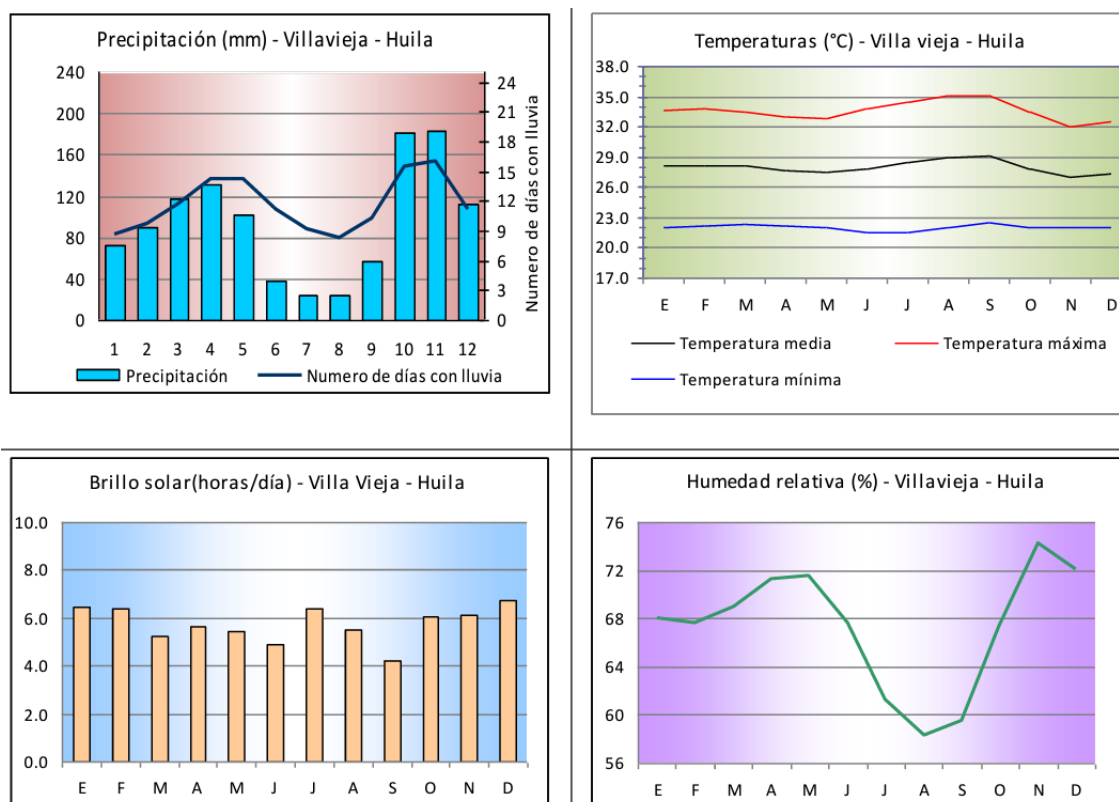


Figura 2. Características generales del clima del municipio de Villavieja [26]

Para realizar el cálculo de la demanda hídrica de la población, el RAS establece hacer una estimación de la población correspondiente a la proyectada al año de horizonte de diseño, por tratarse de una población < 2500 habitantes y capacidad económica baja, la vereda Doche se clasifica en nivel de complejidad de sistema bajo, por lo que el periodo de diseño se realizará con una proyección a 20 años [19].

La proyección de la población se elaborará teniendo en cuenta el tercer censo nacional agropecuario realizado en el año 2014, efectuado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) [27] y el último informe existente elaborado en el año 2023 por la junta de acción comunal de la vereda Doche, los resultados se muestran a continuación.

Tabla 1. Reporte de censos para la vereda Doche

| Censo | 3^{er} censo nacional agropecuario (2014) | Junta de acción comunal vereda Doche (2023) |
|-----------------------------|--|--|
| Reporte de Población | 38 | 68 |

Nota. Esta tabla muestra cómo cambia la población de la vereda Doche en el intervalo de tiempo entre 2014 a 2023.

Con los datos obtenidos de los respectivos censos se procede a realizar la proyección de la población al año 2043 mediante el método Aritmético recomendado por el RAS [19], el resultado obtenido tras el desarrollo de la ecuación aritmética es el mostrado en la ecuación 9.

$$P_f = P_{uc} + \frac{P_{uc} - P_{ci}}{T_{uc} - T_{ci}} * (T_f - T_{uc}) = 68 + \frac{68 - 38}{2023 - 2014} * (2043 - 2023) \quad (9)$$

$$P_f = 135 \text{ personas proyectadas al año 2043}$$

6.1.1 Demanda por el centro poblado de Doche.

La demanda total de agua se obtiene cuando se multiplica la población que va a ser servida por la dotación, según el nivel de complejidad del sistema, variación del clima y porcentaje de pérdidas [19].

Tabla 2. Dotación neta según el nivel de complejidad

| Nivel de complejidad del sistema | Dotación neta mínima (LHD) | Dotación neta máxima (LHD) | Clima cálido (>28°C) | % Perdidas |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|------------|
| bajo | 100 | 150 | + 15% | 40% |

Nota. Tomado del Ministerio de medio ambiente, «GUIA RAS - 001,» Definición del nivel de complejidad y evaluación de la población, la dotación y la demanda de agua, Bogotá, 2003.

En donde la dotación neta por habitante según la tabla 2 se define como la máxima de 173 LHD con un + 15% adicional debida a sus características climáticas, asumiendo el porcentaje de pérdidas del 40%, con este resultado se calcula la “dotación bruta” (dbruta) y en su definición intervienen dos variables: la dotación neta (dneta) y el índice de pérdidas de agua en el sistema de acueducto (%P). El RAS define la dotación bruta en litros por habitante día (LHD) [19]:

$$d_{bruta} = \frac{d_{neta}}{1-\%P} = \frac{173 \text{ LHD}}{1-0,4} = 288 \text{ LHD} \quad (10)$$

Por último, el caudal necesario para los usuarios en el año de proyección será el producto de 135 habitantes y 288LHD, equivalente a 38,88 m³/día.

6.1.2. Demanda media de otros usos.

Esta demanda está asociada al proceso productivo y debe ser calculada de forma específica para las 90 hectáreas de cultivos principalmente de Cacao, plátano y árboles frutales. Según el programa de uso eficiente y ahorro de agua (PUEAA) del distrito de riego de la vereda Doche de Villavieja (Huila), establece los usos otorgados bajo la resolución 2644 del 09 de octubre de 2009 del uso del suelo [20]. A continuación, se presenta en la tabla 3 una proyección de las 90 hectáreas por solicitud de la comunidad, distribuidas en tres zonas de forma equitativa para los cultivos mencionados.

Tabla 3. Demanda de agua de cultivos

| No, hectáreas | Tipo de cultivo | Caudal Teórico | Caudal Total |
|---------------|-----------------|----------------|--------------|
| 30 | Cacao | 0,8 L/s ha. | 24 L/s |

| No, hectáreas | Tipo de cultivo | Caudal Teórico | Caudal Total |
|---------------------------|--------------------|----------------|--------------|
| 30 | Plátano | 0,8 L/s ha. | 24 L/s |
| 30 | Frutales de papaya | 1,73 L/s ha. | 51,9 L/s |
| Total 90 hectáreas | | | 99,9 L/s |

Nota. Tomado del programa de uso eficiente y ahorro de agua PUEAA del distrito de riego de la vereda el Doche, Villavieja, Huila

6.1.3. Cálculo de la demanda hídrica.

La demanda total de agua corresponde a la sumatoria de las demandas originadas por los diferentes usos que se le da al suministro por día. Para realizar la proyección de la demanda de agua se tendrá en cuenta la dotación bruta residencial y la demanda para otros usos, para ello se realiza un esquema semanal considerando 17 horas de uso doméstico por día para el centro poblado de la vereda Doche ($39 \text{ m}^3/\text{día}$) y 8 horas diarias cada dos días para riego de los cultivos mencionados en la tabla 3, correspondientes a $2.877 \text{ m}^3/\text{día}$. El riego recomendado es por goteo y en horas de la madrugada para evitar la evaporación, estudios demuestran que esta práctica acelera la velocidad del desarrollo y mejora los rendimientos sin afectar la periodicidad del ciclo de crecimiento de las plantas, logrando una infiltración de hasta 7 mm [28]. Con los tiempos determinados se realiza un esquema de uso semanal, de tal manera que el balance hídrico completo es el siguiente:

Tabla 4. Demanda hídrica por semana

| | Riego | Uso domestico | Caudal uso doméstico (m3/día) | Caudal Riego (m3/día) | Caudal Total (m3/día) |
|------------------|--------|---------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Lunes | | X (17h) | 39 | 0 | 39 |
| Martes | X (8h) | X (17h) | 39 | 2877 | 2916 |
| Miércoles | | X (17h) | 39 | 0 | 39 |
| Jueves | X (8h) | X (17h) | 39 | 2877 | 2916 |
| Viernes | | X (17h) | 39 | 0 | 39 |
| Sábado | X (8h) | X (17h) | 39 | 2877 | 2916 |
| Domingo | | X(17h) | 39 | 0 | 39 |

Nota. Esta tabla muestra la distribución de la demanda de agua según su uso semanal.

tanque mínimo aproximado de 537m^3 los días martes, jueves y sábado en horas de la madrugada, días en los que la demanda por riego es de 2877m^3 . El nivel del tanque mínimo será utilizado como medida para temporadas de sequía o días de poca irradiancia.

Obtenida la demanda de caudal y tamaño de reservorio se procede a realizar el reconocimiento detallado del área de interés, en donde se definen geográficamente con base a planos y mapas topográficos proporcionados Google Earth y ArcGIS la localización de los componentes, los cuales estarán ubicados según la figura 4, en verde el área beneficiada para los cultivos equivalente a 90 hectáreas con capacidad de riego por gravedad, la línea blanca corresponde a la tubería y el recuadro al tanque de almacenamiento.

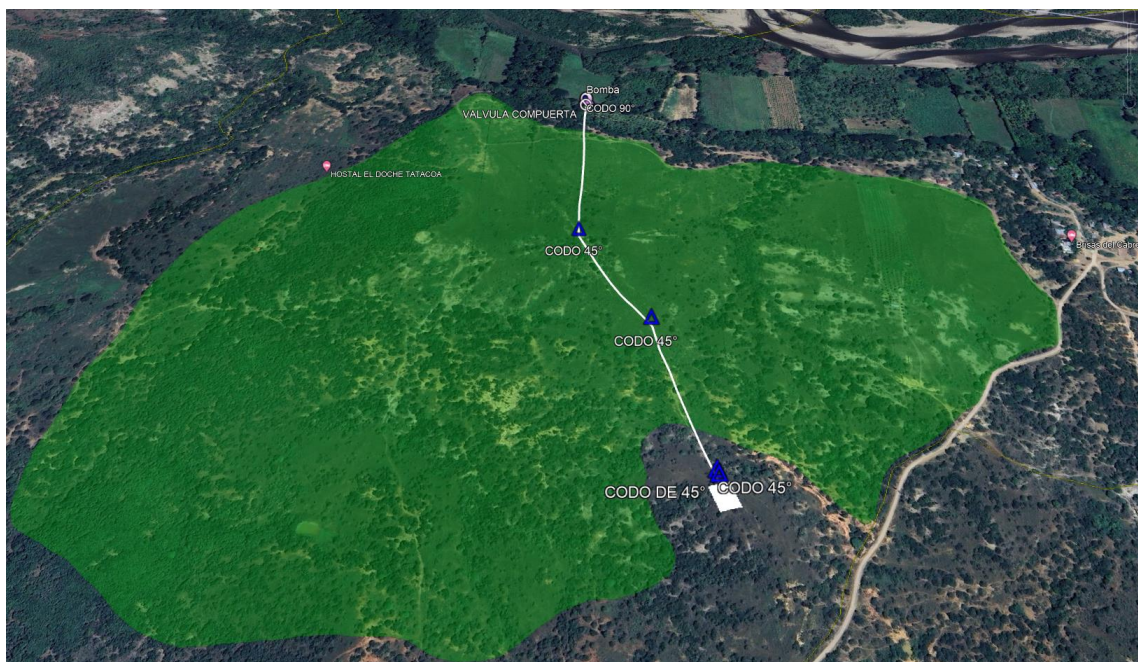


Figura 4. Sistema de bombeo y área de interés para la ampliación de la frontera agrícola

El reservorio se ubicará a 487 m de altura en las coordenadas de $3^{\circ}16'50.24''\text{N}$ $75^{\circ}03'45.88''\text{O}$, 46 metros por encima de la cota más baja. El punto de captación se ubicará en las coordenadas $3^{\circ}17'17.31''\text{N}$ $75^{\circ}03'50.70''\text{O}$, el cuarto de bombas se establecerá en las coordenadas $3^{\circ}17'16.75''\text{N}$ $75^{\circ}03'50.71''\text{O}$. La distancia entre el punto de captación y el reservorio será de 860 metros de tubería que deberá estar bajo tierra a 0,6m por tratarse

de zona agrícola [30]. Con las características mencionadas se procede a realizar detalladamente el dimensionamiento del sistema hidráulico.

6.2 Dimensionamiento del sistema hidráulico.

Para satisfacer las necesidades ya mencionadas de 801.3 gpm se propone un sistema acoplado de dos bombas en paralelo para satisfacer la demanda de agua variable en el tiempo, útiles para sistemas de riego o en redes de distribución. El suministro variable según la demanda puede garantizarse por medio de una progresiva entrada en funcionamiento por bombas acopladas en paralelo, manteniendo el mismo caudal e iguales pérdidas [31]. El diseño del sistema hidráulico inicialmente estará compuesto por las características de caudal y topografía mencionadas en el numeral 6.1.3, donde se establece un sistema para cada bomba equivalente a 400.7gpm, la topografía y el esquema del sistema se mostrarán en las figuras 5 y 6.

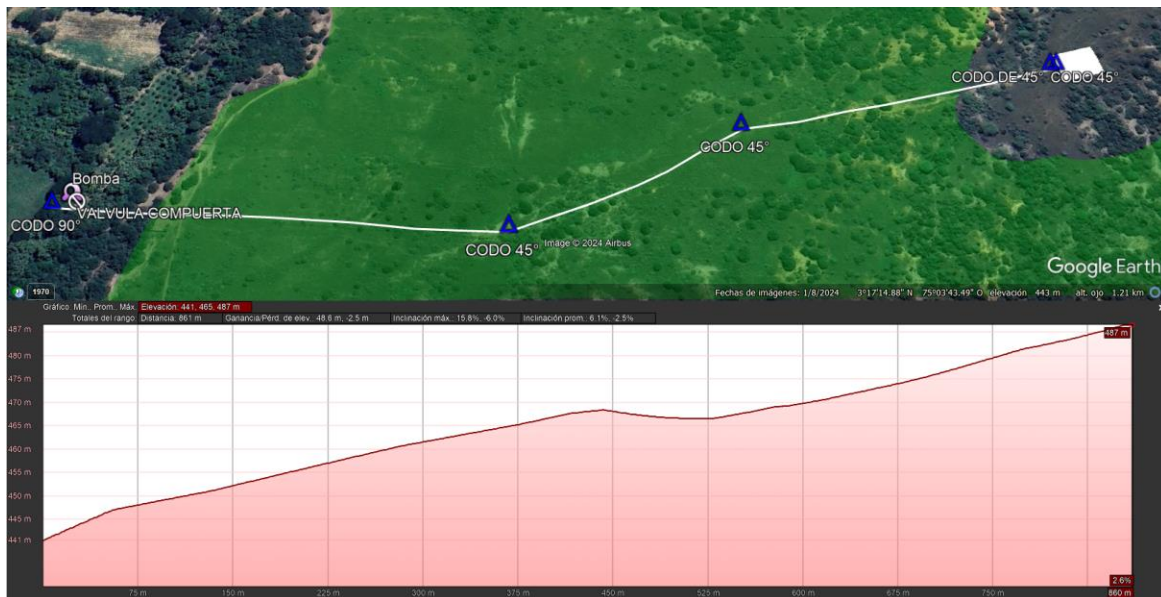


Figura 5. Altura de bombeo desde el punto de captación al reservorio

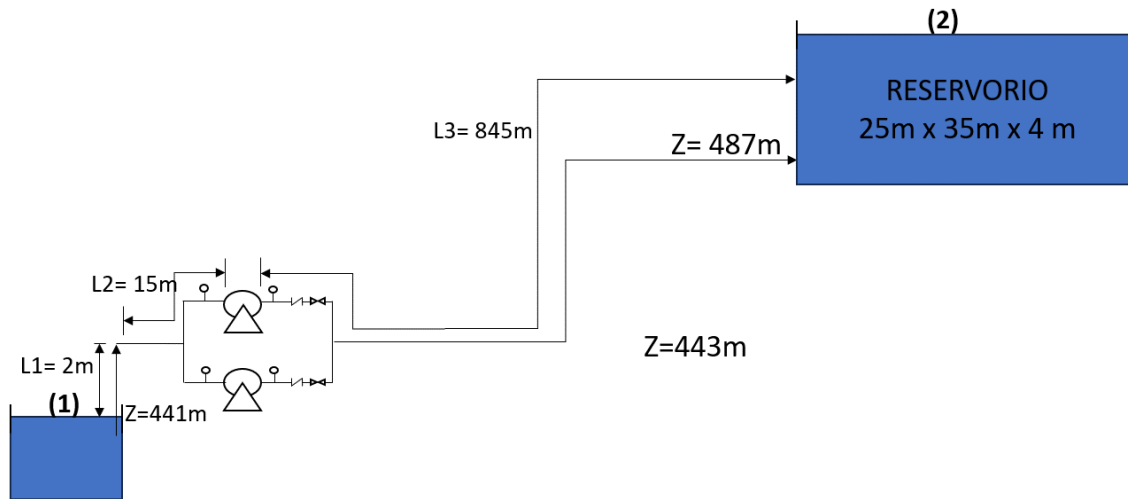


Figura 6. Diagrama del sistema de bombeo

Para la selección de las bombas en paralelo es necesario conocer las pérdidas friccionales por tubería y accesorios del sistema mostrado en la figura 6, los cálculos se realizan para una sola línea de tubería y bomba, para ello se establece el punto (1) correspondiente a la superficie del canal de riego y el punto (2) corresponde a la superficie del reservorio como base para formular la ecuación general de energía o Bernoulli.

De acuerdo con el sistema mostrado en la figura 6, algunos términos de la ecuación de Bernoulli (ecuación 3) se cancelan: $P_1=0$ y $P_2=0$, superficie de los depósitos de agua expuestos a la presión atmosférica; $V_1=0$ y $V_2=0$, porque el área de la superficie de los depósitos es relativamente grande en comparación al área de tubería de succión y descarga; $H_T=0$, al no existir un dispositivo mecánico que remueva energía al fluido. Con la simplificación de los cálculos de la ecuación (3), ésta termina en función de la altura y las pérdidas totales de la siguiente manera.

$$H_B = Z_2 - Z_1 + h_{f_{1 \rightarrow 2}} + h_{L_{1 \rightarrow 2}} = Z_2 - Z_1 + f_1 * \frac{l_1}{D_1} * \frac{V_1^2}{2g} + f_2 * \frac{l_2}{D_2} * \frac{V_2^2}{2g} + \sum K * \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) + \sum K * \left(\frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (11)$$

Para encontrar las pérdidas totales de energía del sistema; el diámetro nominal de la línea de succión es de 8" de acero comercial cedula 40 y una longitud de 56ft, el diámetro

nominal de la línea de descarga es de 6" con una longitud total de 2772ft de acero comercial cedula 40. Estos diámetros nominales son seleccionados teniendo en cuenta el caudal total necesario de 801,3gpm para el sistema acoplado por dos bombas, éstos favorecen la disminución de presión y velocidad evitando la erosión y corrosión, mejorando su vida útil [32]. La evaluación de las pérdidas de energía debido a la fricción $h_{f_{1 \rightarrow 2}}$ se realizan por medio de la ecuación de Darcy–Weisbach (Ecuación 4) con las respectivas longitudes de succión y descarga. Las pérdidas proporcionales a la cabeza de velocidad del fluido al fluir alrededor de los accesorios $h_{L_{1 \rightarrow 2}}$ se calculan separadamente para cada tubería mediante la ecuación 5, se determinan las longitudes equivalentes L_{eq} (línea de succión y descarga) o la respectiva perdida (k) para los tramos de tubería según la cantidad determinada de accesorios incluidos en la figura 6. Dentro de los accesorios utilizados para la línea de succión se encuentran una válvula de pie con pivote y coladera (cuenta con una pérdida equivalente de 10,6 m), codo de 90° estándar, codo de 90° de radio largo y una te estándar, en la tubería de descarga se localizan una válvula de compuerta (Principalmente para mantenimientos), válvula de retención, una te estándar, codo estándar de 90° y dos codos de 45° estándar.

Los valores determinados de las ecuaciones 4 y 5 para pérdidas friccionales y localizadas son remplazados en la ecuación 11, dando como resultado la cabeza de bomba mostrada en la ecuación 12.

$$H_B = 1597,7ft - 1446,8ft + \frac{0,0195 * 56ft * 2,571^2 \frac{ft^2}{s^2}}{2 * 0,6651ft * 32,2 \frac{ft}{s^2}} + \frac{0,0175 * 2772ft * 4,450^2 \frac{ft^2}{s^2}}{2 * 0,5054ft * 32,2 \frac{ft}{s^2}} + \frac{2,571^2 \frac{ft^2}{s^2} * 7,85}{2 * 32,2 \frac{ft}{s^2}} + \frac{4,450^2 \frac{ft^2}{s^2} * 4,44}{2 * 32,2 \frac{ft}{s^2}}$$

$$H_B = 1597,7ft - 1446,8ft + 29,7ft + 2,2ft = 182,8ft \quad (12)$$

Para la selección de la bomba, ésta se realiza mediante la intersección de las curvas que incluye todos los elementos encontrados en la red de tuberías, para este caso la cabeza

de bomba y caudal requeridos son de 183ft y 401gpm respectivamente, ver figura 7, de estas se obtiene que la bomba necesaria para el transporte del fluido es una bomba centrífuga de 3500 rpm tipo NOWA 6516, en donde las principales características son; diámetro de impulsor nominal de 174 mm, eficiencia de la bomba nominal de 69 %, eficiencia máxima de la bomba de 74%, caudal nominal de la bomba de 401gpm, caudal óptimo de la bomba de 585gpm, caudal máximo de la bomba de 760gpm, potencia consumida nominal de 29kW (Consumo total de 58kW) y NPSHR equivalente de 5,5 m (18 ft) con un factor de seguridad de 0,5m [22].

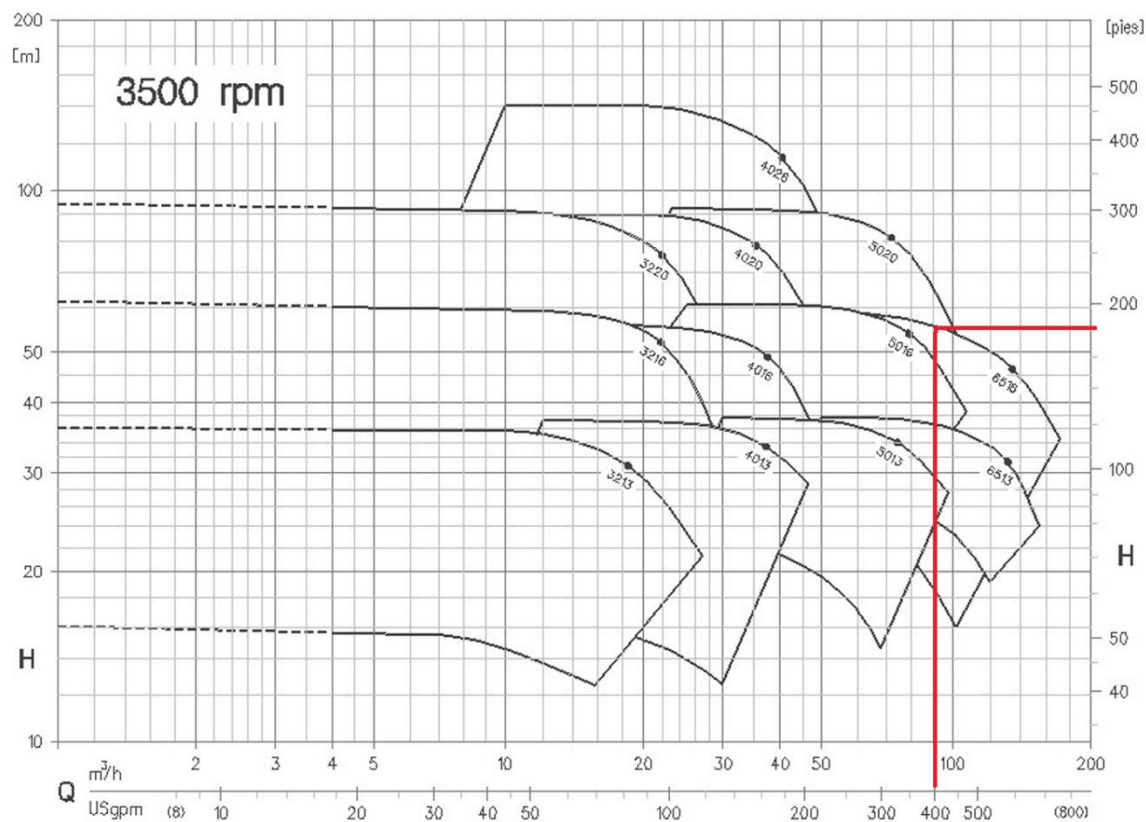


Figura 7. Diagrama para la selección de bombas de 3500rpm HALBERG NOWA Bombas Centrífugas de Carcasa Espiral

Al diseñar o instalar un sistema de bombeo, un parámetro para tener en cuenta es la cabeza neta de succión disponible (NPSHA), con la ayuda de las ecuaciones (3), (7) y (8),

se obtienen los resultados para el cálculo de la NPSHA, ésta debe ser mayor a NPSHR del fabricante, de lo contrario la bomba cavitará, esta se calcula mediante la ecuación 6.

$$NPSHA = P_s - P_{vap} + P_{atm} = -7,544 \text{ ft} - 1,06 \text{ ft} + 32,19 \text{ ft} = 23,6 \text{ ft}$$

Con los resultados se concluye que NPHSA (23,6ft) > NPSHR (18ft), por tanto, la bomba no cavitará y satisface las necesidades del sistema.

6.3 Diseño del sistema Fotovoltaico.

Con la respectiva demanda de energía identificada por parte del sistema de bombeo de la etapa anterior, se procede a realizar el análisis del recurso solar y posteriores simulaciones con ayuda del programa PVsyst para satisfacer las necesidades energéticas correspondientes a las dos bombas, en total 58KW de potencia por un tiempo de 8 horas al día son necesarias para mantener el sistema de almacenamiento de agua estable. Con este software se dimensiona el tamaño de las instalaciones teniendo en cuenta la radiación solar que recibe en función de su ubicación gracias a su base de datos meteorológica [12]. Estableciendo el tipo y numero de paneles solares FV, potencia, ángulo de inclinación, eficiencia, vida útil, inversores y área total requerida.

El diagrama de la radiación normal directa (DNI) para la vereda Doche generado por la página web de global solar atlas, permite observar las horas favorables para el desarrollo de la tecnología por medio de paneles solares, de la figura 8 se observa que el periodo comprendido entre las 08:00 horas y hasta las 16:00 horas presenta la mejor radiación solar, que oscila entre 229Wh/m² a 622Wh/m², en donde los meses con mayor irradiancia directa se encuentran en los periodos comprendidos entre mayo a junio y septiembre a febrero [33].

| | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | Jul | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 - 1 | | | | | | | | | | | | |
| 1 - 2 | | | | | | | | | | | | |
| 2 - 3 | | | | | | | | | | | | |
| 3 - 4 | | | | | | | | | | | | |
| 4 - 5 | | | | | | | | | | | | |
| 5 - 6 | | | | | | | | | | | | |
| 6 - 7 | 47 | 26 | 27 | 58 | 98 | 111 | 93 | 83 | 99 | 95 | 74 | 69 |
| 7 - 8 | 196 | 137 | 112 | 155 | 198 | 231 | 237 | 223 | 226 | 197 | 162 | 207 |
| 8 - 9 | 320 | 241 | 191 | 229 | 276 | 311 | 324 | 315 | 328 | 289 | 258 | 305 |
| 9 - 10 | 440 | 347 | 280 | 311 | 352 | 389 | 394 | 391 | 418 | 388 | 359 | 411 |
| 10 - 11 | 542 | 454 | 380 | 398 | 433 | 448 | 458 | 463 | 493 | 478 | 480 | 521 |
| 11 - 12 | 613 | 532 | 441 | 462 | 521 | 514 | 528 | 498 | 511 | 532 | 554 | 594 |
| 12 - 13 | 622 | 557 | 458 | 465 | 520 | 517 | 511 | 462 | 496 | 544 | 586 | 619 |
| 13 - 14 | 590 | 516 | 452 | 448 | 478 | 452 | 433 | 400 | 448 | 498 | 553 | 576 |
| 14 - 15 | 522 | 461 | 392 | 407 | 438 | 417 | 389 | 353 | 373 | 430 | 475 | 517 |
| 15 - 16 | 444 | 385 | 318 | 344 | 381 | 369 | 351 | 312 | 313 | 342 | 370 | 432 |
| 16 - 17 | 341 | 277 | 230 | 256 | 314 | 310 | 298 | 263 | 250 | 232 | 254 | 309 |
| 17 - 18 | 157 | 136 | 100 | 107 | 139 | 182 | 188 | 157 | 94 | 57 | 58 | 98 |
| 18 - 19 | | | | | | | | | | | | |
| 19 - 20 | | | | | | | | | | | | |
| 20 - 21 | | | | | | | | | | | | |
| 21 - 22 | | | | | | | | | | | | |
| 22 - 23 | | | | | | | | | | | | |
| 23 - 24 | | | | | | | | | | | | |
| Sum | 4,834 | 4,068 | 3,381 | 3,641 | 4,148 | 4,252 | 4,203 | 3,920 | 4,050 | 4,082 | 4,182 | 4,658 |

Figura 8. Diagrama de irradiancia normal directa en Wh/m²

En general se puede afirmar que para la zona se cuenta con el recurso solar suficiente para el desarrollo de la tecnología renovable por paneles solares. La simulación y el análisis del sistema fotovoltaico se realiza por medio del programa PVsyst versión 7.3, en la ubicación geográfica de 3°17'12,70"N 75°3'50,56"O, por tratarse de una zona despejada, libre de sombras y con las condiciones óptimas necesarias para el sistema fotovoltaico, además el terreno hace parte de los predios de la comunidad para el desarrollo de la tecnología.

6.3.1 Dimensionamiento de la red fotovoltaica.

Definido el sitio geográfico según las coordenadas establecidas y el consumo energético del sistema de bombeo, se procede a realizar la selección de los parámetros fijos correspondientes a la simulación del programa PVsyst versión 7.3, iniciando con el diagrama de recorrido solar y selección del grado óptimo de inclinación con dirección al sur (7,5°) a través de un plano fijo y posterior a este se define el sistema de red, en donde se establecen los paneles solares Jinkosolar (600Wp 38V monocristalinos JKM-600N-78HL4-BDV), porque presentan óptimas características de captura de luz y recolección de corriente para mejorar la salida de potencia, excelente garantía de rendimiento Anti-PID a través de procesos y materiales de producción en masa optimizados. La potencia del módulo aumenta entre un 5% y un 25% en general, el módulo tipo N con tecnología Hot 2.0 tiene mejor Fiabilidad y menor LID/LETID, adicional a estos los paneles tienen

garantía de 12 años y una vida útil de 30 años con una degradación anual de 0,4% [34]. El inversor utilizado para el proyecto será de la marca Power Electronics para la potencia deseada, se asumen pérdidas del 3% por suciedad y de cableado [14]. Las necesidades del usuario se establecen como 58KW por un periodo de 8 horas diarias y constantes durante el año. A continuación, se muestran en la figura 9 algunas de las variables que se mantienen constantes entre simulaciones del programa PVsyst.

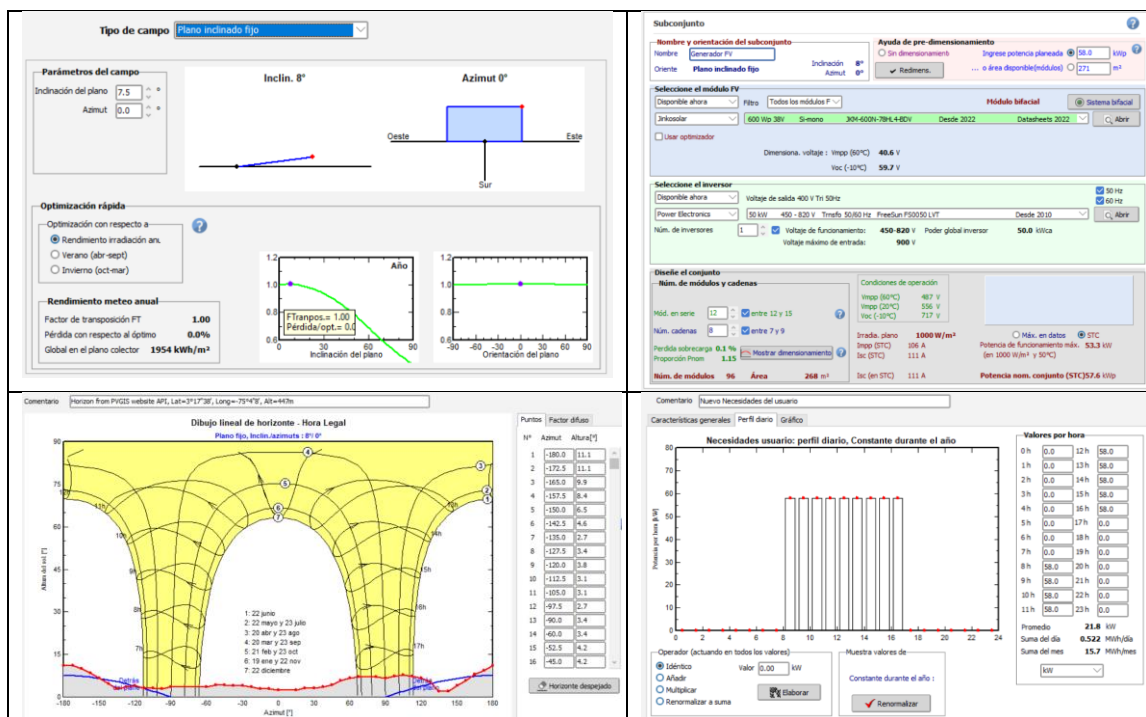


Figura 9. Parámetros fijos utilizados en las simulaciones de PVsyst

Para analizar un panorama completo se procede a realizar tres simulaciones en los extremos de potencia del sistema solar fotovoltaico, conservando las características mencionadas en la figura 9, variando desde un sistema independiente con baterías y potencia pico de 142KWp, a dos conectados a la red que varían entre extremos de potencia requerida de 59KWp y un consumo elevado de red aproximado del 56%, a otro con una potencia de 144KWp y consumo de la red del 17%. Estas simulaciones permiten dar un panorama completo del diseño a fin de definir cuál es la mejor opción. En las tablas 5 y 6 mostradas a continuación se relacionan los resultados de las tres simulaciones obtenidas

por el programa PVsyst y sus principales características, los reportes detallados de cada una de estas se encuentran en los anexos A, B y C.

Tabla 5. Características principales de los arreglos fotovoltaicos simulados por PVsyst

| Sistema Solar Fotovoltaico | No. módulos FV de 600Wp/área | Arreglo | Potencia FV total (KWp) | Batería Lithium – ion (LFP-CB 12.8V / 200Ah) | Controlador |
|---|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------------|---|---|
| Independiente con baterías (Anexo A) | 236 UN/ 660 m ² | 118 cadenas x 2 en serie | 142KWp | 508,7 KWh (56 en paralelo x 4 en serie) modelo LFP-CB 12.8V / 200Ah | Convertidor MPPT |
| Conectado red 58KWp (Anexo B) | 96 UN/ 268m ² | 8 cadenas x 12 en serie | 57,6KWp | - | 1 Inversor power Electronic FreeSun FS0050 LVT (50..0 kWca) |
| Conectada red 144KWp (Anexo C) | 240UN/ 671m ² | 20 cadenas x 12 en serie | 144 KWh | - | 2 Inversor power Electronic FreeSun FS0050 LVT (60.0 kWca) |

Tabla 6. Resultados de simulaciones en PVsyst en función de la energía requerida por día

| Sistema Solar Fotovoltaico | Energía almacenada por baterías KWh | Energía inyectada a la red (KWh)/día | Energía de la red (KWh)/día | Energía Suministrada al usuario KWh/día | Energía Requerida (KWh)/día |
|---|--|---|------------------------------------|--|------------------------------------|
| Independiente con baterías (Anexo A) | 508,7 | - | - | 454,6 | 464 |
| Conectado red 58KWp (Anexo B) | - | 14,1 | 291,9 | 522 | 464 |
| Conectada red 144KWp (Anexo C) | - | 176,7 | 91,1 | 522 | 464 |

Los resultados de las tres simulaciones realizadas permiten analizar el mejor diseño del sistema solar fotovoltaico, en donde la simulación del sistema independiente con

baterías (anexo A) permite definir un sistema autónomo que mantendrá el sistema de bombeo estable por 8 horas requeridas de energía a 58 kW, gracias a su potencia total de 142kWp y capacidad de almacenamiento en baterías equivalente a 508,7kWh, este sistema garantiza la autonomía suficiente para un día de funcionamiento con capacidad de recarga gracias a su potencia pico. La energía almacenada durante el día puede usarse durante la noche o en periodos nublados, proporcionando una fuente de energía constante y confiable en donde el punto menos favorable es la inversión inicial [12].

Analizando las simulaciones realizadas para los sistemas conectados a la red, se puede deducir que la simulación de baja capacidad instalada, correspondiente al anexo B con potencia pico de 58kW, muestra un requerimiento de 55,8% de energía de la red para satisfacer las necesidades del sistema, este valor corresponde a 291,9KWh/día, el porcentaje elevado y altos costos en la energía, hacen replantear el sistema con una potencia equivalente al sistema independiente con baterías del anexo A, con una potencia de 144kWp (Anexo C), que necesita tomar de la red solo un 17,4% equivalentes a 91,1kWh y que a su vez inyecta 176,7kWh a la red por día, el cual equipara el costo total de kilovatio consumido si el precio de inyección a la red está al 50% del precio pagado, adicional a esto, el sistema cuenta con un controlador que regula la energía entre las horas de bombeo comprendidas entre las 8:00 horas a las 16:00 horas, reduciendo el consumo de la red que no discrimina el programa de PVsyst entre las horas necesarias para mantener el reservorio de agua lleno en dos días de funcionamiento. Una desventaja en los sistemas de energía solar fotovoltaica conectados a la red, es el apagado que surge cuando se pierde la energía de la red o cuando se abre el interruptor de desconexión de CA del sistema fotovoltaico [14], para ello se sobredimensionó el tanque de almacenamiento en un 20%, además de ser evaluadas en las simulaciones con un porcentaje del 5% anual en fallas del sistema.

Con la información descrita de cada simulación se procede seleccionar el diseño del sistema solar fotovoltaico conectado a la red con una potencia de 144KWp, el cual cuenta con 240 paneles solares fotovoltaicos conectados en arreglo de 20 cadenas por 12 en serie y 2 Inversores de la marca power Electronic FreeSun FS0050 LVT de 60 kWca. Este sistema solar fotovoltaico presenta principalmente ventajas económicas al no

implementar un sistema de acumulación de energía que pueden llegar incrementar el costo del Capex hasta un 200% del sistema [35] y debido al requerimiento mínimo de energía a la red y máxima inyección a fin de disminuir los costos operativos.

Con la información recolectada es posible contemplar el modelado del sistema hidráulico y diagrama unifilar del sistema a 144KWp y la respectiva ubicación en la coordenada geográfica de $3^{\circ}17'12,70''N$ $75^{\circ}3'50,56''O$, como se muestra en las figuras 10 y 11.

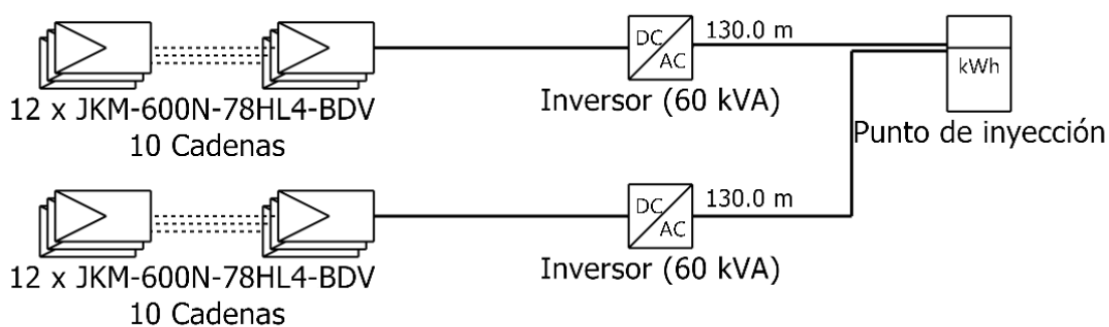


Figura 10. Diagrama unifilar sistema 144KWp conectado a la red



Figura 11. Diagrama completo del proyecto definido por áreas

6.4 Evaluación financiera.

Con la consecución de las etapas uno, dos y tres, se realiza la respectiva evaluación financiera teniendo en cuenta las siguientes consideraciones; el consumo de energía permanecerá igual en el tiempo, toda la producción es rentable y los excedentes se venden al 40% del precio de KWh establecido [36], porque la autoridad local permite net metering, se requiere un mantenimiento anual después de la instalación y cada diez años se requiere realizar un reacondicionamiento del sistema. Adicional a las consideraciones se tienen en cuenta el 0,40% de degradación anual de los paneles solares por los 30 años de proyecto y algunos supuestos financieros, en donde los costos de electricidad se incrementan según la inflación promedio de los últimos 14 años en 5,38% durante el tiempo de vida del proyecto [37]. Por último, permisos de construcción y ambientales.

Para la evaluación económica de este proyecto se tienen en cuenta los costos de equipos para el sistema solar fotovoltaico, como paneles solares, inversores, soportes, costos por cableado, conexiones, valor de instalación y los necesarios para el sistema de bombeo, como tuberías, bombas, accesorios, tanque de almacenamiento o reservorio y obras civiles. Otros costos importantes a tener en cuenta son los precios por transporte, esto para equipos y personal, en donde se proyectó una cantidad de 10 personas capacitadas en realización de proyectos solares y obras civiles. También se tiene en cuenta capacitación del personal de la comunidad para el manejo del sistema global, siendo importante mencionar que la comunidad se encuentra en disposición de aportar mano de obra necesaria para el trabajo de campo y todo lo que devengue el proyecto que se encuentre dentro de sus capacidades, los terrenos necesarios y las herramientas que se encuentren a disposición. Los resultados se muestran en las tablas 7 y 8.

Tabla 7. Costos iniciales del sistema solar fotovoltaico y obras civiles

| Consto Inicial | Sistema FV | | Total | Unidad |
|---|------------|----------------|----------------|--------|
| | Cantidad | Precio/unidad | | |
| paneles solares Jinkosolar (600Wp 38V monocristalinos JKM-600N-78HL4-BDV) | 240 | \$ 605.012 | \$ 145.202.911 | COP |
| Inversor power Electronic FreeSun FS0050 LVT (60.0 kWca) | 2 | \$ 32.812.500 | \$ 65.625.000 | COP |
| Contador bidireccional trifásico (KWh) | 1 | \$ 1.980.000 | \$ 1.980.000 | |
| Soportes | 118 | \$ 254.325 | \$ 30.010.350 | COP |
| Transporte terrestre | 1 | \$ 40.000.000 | \$ 40.000.000 | COP |
| Capacitación a Personal | 1 | \$ 5.000.000 | \$ 5.000.000 | COP |
| Personal de obra | 10 | \$ 8.000.000 | \$ 80.000.000 | COP |
| Obras civiles | 1 | \$ 40.000.000 | \$ 40.000.000 | COP |
| Instalaciones | 1 | \$ 25.000.000 | \$ 25.000.000 | COP |
| Permisos | 1 | \$ 8.000.000 | \$ 8.000.000 | COP |
| Otros | 1 | \$ 20.000.000 | \$ 20.000.000 | COP |
| TOTAL + IVA | | \$ 460.818.261 | | COP |

Tabla 8. Costos iniciales y obras civiles del sistema hidráulico y reservorio

| Consto Inicial | Sistema Hidráulico | | Total | Unidad |
|--|--------------------|----------------|---------------|--------|
| | Cantidad | Precio/unidad | | |
| Bomba centrifuga 3500rpm (Caudal máx. 760gpm) | 2 | \$ 36.859.900 | \$73.719.800 | COP |
| Válvula de compuerta 6" | 1 | \$ 2.025.000 | \$2.025.000 | COP |
| Válvula de retención | 1 | \$ 1.407.865 | \$1.407.865 | COP |
| Válvula de pie con coladera | 1 | \$ 568.630 | \$568.630 | COP |
| Codo estándar de 90° | 2 | \$ 192.000 | \$384.000 | COP |
| Codo de radio largo de 90° | 1 | \$ 198.000 | \$198.000 | COP |
| Codo estándar de 45° | 2 | \$ 135.000 | \$270.000 | COP |
| Te estándar con flujo de paso de lado | 2 | \$ 201.000 | \$402.000 | COP |
| Tubería acero comercial calibre 40 (867m) | 155 | \$ 254.898 | \$39.509.190 | COP |
| Obras civiles (Almacenamiento y tubería) | 1 | \$ 420.000.000 | \$420.000.000 | COP |
| Permisos | 1 | \$ 4.000.000 | \$4.000.000 | COP |
| Otros | 1 | \$ 25.000.000 | \$25.000.000 | COP |
| TOTAL + IVA | | \$ 567.484.485 | | COP |

La evaluación de los costos iniciales totales según la tabla 9 corresponden a \$1.028.302.746,20 COP, equivalentes al total del sistema de bombeo solar fotovoltaico mostrado en las tablas 7 y 8, ésta es la propuesta inicial para la realización del proyecto, pero hay otros factores para tener en cuenta, como lo son; precios de generación, costos de mantenimiento por años, costos de acondicionamiento, inflación y el aumento del costo de la energía. Todos estos factores se tienen en cuenta y se aclararan en porcentajes y precios que se presentan sobre el valor del costo inicial.

Tabla 9. Costo inicial y otros factores a tener encuesta en la proyección económica

| Datos problema | | |
|--|--------------------|---------------|
| Tipo | Valor | Unidad |
| Costo Inicial total (sistema hidráulico y solar) | \$1.028.302.746,20 | COP |
| Consumo | 237349 | kWh |
| % Producción | 66,26 | % |
| Precio kWh | \$969,45 | COP |
| Porcentaje mantenimiento | 0,12 | % |
| Costo reacondicionamiento | \$8.000.000,00 | COP |
| % Inflación | 5,38 | % |
| Energía de la red | 33224 | KWh |
| Energía inyectada a la red | 64487 | KWh |
| Precio inyectado a la red | 387,78 | COP/KWh |

Con los valores reportados en la tabla 9 se realiza la proyección económica del proyecto a 30 años (vida útil paneles solares). La proyección calcula la rentabilidad de la inversión y cuál será la ganancia total del proyecto, esta se realiza mediante el valor presente neto (VPN) que consta de llevar el valor de los flujos de efectivo proyectados descontados al presente [25]. Los resultados completos se muestran en la tabla 10 y figura 12.

Tabla 10. Proyección de costos y ganancias de proyecto a 30 años

| Año | Costo | kWh ahorrado | \$ Inyeccion Red/año | \$ inyectada a Red/año | \$ ahorro/año | Operación Mantenimiento /año | Reacondiciona miento | Flujo de caja Neto /año | PW del flujo de caja / año | VPN |
|-----|----------------------|---------------|----------------------|------------------------|-------------------|------------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------|
| 0 | -\$ 1.028.302.746,20 | | | | | | | | | -\$ 1.028.302.746,20 |
| 1 | | \$ 156.638,38 | -\$ 34.584.513,10 | \$ 26.246.724,49 | \$ 160.022.770,62 | -\$ 1.300.350,52 | | \$ 150.384.631,50 | -\$ 134.271.992,41 | -\$ 894.030.753,79 |
| 2 | | \$ 156.009,31 | -\$ 37.122.396,83 | \$ 27.547.718,76 | \$ 167.954.758,75 | -\$ 1.370.309,38 | | \$ 157.009.771,30 | -\$ 125.167.228,39 | -\$ 768.863.525,40 |
| 3 | | \$ 155.380,24 | -\$ 39.833.254,06 | \$ 28.912.730,44 | \$ 176.277.052,49 | -\$ 1.444.032,02 | | \$ 163.912.496,85 | -\$ 116.669.677,63 | -\$ 652.193.847,77 |
| 4 | | \$ 154.751,17 | -\$ 42.728.350,97 | \$ 30.344.882,16 | \$ 185.008.690,07 | -\$ 1.521.720,95 | | \$ 171.103.500,31 | -\$ 108.739.367,73 | -\$ 543.454.480,05 |
| 5 | | \$ 154.122,10 | -\$ 45.819.665,35 | \$ 31.847.447,24 | \$ 194.169.628,50 | -\$ 1.603.589,53 | | \$ 178.593.820,85 | -\$ 101.338.930,22 | -\$ 442.115.549,83 |
| 6 | | \$ 153.493,03 | -\$ 49.119.930,51 | \$ 33.423.856,88 | \$ 203.780.787,35 | -\$ 1.689.862,65 | | \$ 186.394.851,07 | -\$ 94.433.432,38 | -\$ 347.682.117,45 |
| 7 | | \$ 152.863,96 | -\$ 52.642.681,92 | \$ 35.077.707,67 | \$ 213.864.094,56 | -\$ 1.780.777,26 | | \$ 194.518.343,05 | -\$ 87.990.219,85 | -\$ 259.691.897,60 |
| 8 | | \$ 152.234,89 | -\$ 56.402.306,70 | \$ 36.812.769,46 | \$ 224.442.534,35 | -\$ 1.876.583,08 | | \$ 202.976.414,04 | -\$ 81.978.769,31 | -\$ 177.713.128,30 |
| 9 | | \$ 151.605,82 | -\$ 60.414.096,02 | \$ 38.632.993,58 | \$ 235.540.197,48 | -\$ 1.977.543,25 | | \$ 211.781.551,80 | -\$ 76.370.550,69 | -\$ 101.342.572,61 |
| 10 | | \$ 150.976,75 | -\$ 64.694.300,77 | \$ 40.542.521,46 | \$ 247.182.333,72 | -\$ 2.083.935,07 | -\$ 13.510.515,79 | \$ 207.436.103,55 | -\$ 66.788.873,64 | -\$ 34.553.703,96 |
| 11 | | \$ 150.347,68 | -\$ 69.260.190,58 | \$ 42.545.693,66 | \$ 259.395.406,84 | -\$ 2.196.050,78 | | \$ 230.484.859,14 | -\$ 66.258.889,36 | \$ 31.705.185,40 |
| 12 | | \$ 149.718,61 | -\$ 74.130.116,37 | \$ 44.647.059,30 | \$ 272.207.152,20 | -\$ 2.314.198,31 | | \$ 240.409.896,82 | -\$ 61.707.232,61 | \$ 93.412.418,01 |
| 13 | | \$ 149.089,54 | -\$ 79.323.576,70 | \$ 46.851.385,91 | \$ 285.646.636,92 | -\$ 2.438.702,18 | | \$ 250.735.743,95 | -\$ 57.462.161,06 | \$ 150.874.579,06 |
| 14 | | \$ 148.460,47 | -\$ 84.861.288,19 | \$ 49.163.669,84 | \$ 299.744.322,92 | -\$ 2.569.904,36 | | \$ 261.476.800,21 | -\$ 53.503.933,86 | \$ 204.377.912,93 |
| 15 | | \$ 147.831,40 | -\$ 90.765.260,10 | \$ 51.589.146,99 | \$ 314.532.132,89 | -\$ 2.708.165,21 | | \$ 272.647.854,56 | -\$ 49.811.743,67 | \$ 254.189.656,60 |
| 16 | | \$ 147.202,33 | -\$ 97.058.873,49 | \$ 54.133.304,20 | \$ 330.043.519,24 | -\$ 2.853.864,50 | | \$ 284.264.085,45 | -\$ 46.369.630,02 | \$ 300.559.286,62 |
| 17 | | \$ 146.573,26 | -\$ 103.766.965,07 | \$ 56.801.891,02 | \$ 346.313.536,39 | -\$ 3.007.402,41 | | \$ 296.341.059,93 | -\$ 43.160.398,36 | \$ 343.719.684,98 |
| 18 | | \$ 145.944,19 | -\$ 110.915.916,22 | \$ 59.600.932,19 | \$ 363.378.916,22 | -\$ 3.169.200,66 | | \$ 308.894.731,52 | -\$ 40.168.544,28 | \$ 383.888.229,26 |
| 19 | | \$ 145.315,12 | -\$ 118.533.747,27 | \$ 62.536.740,52 | \$ 381.278.147,16 | -\$ 3.339.703,66 | | \$ 321.941.436,76 | -\$ 37.379.582,57 | \$ 421.267.811,83 |
| 20 | | \$ 144.686,05 | -\$ 126.650.217,46 | \$ 65.615.930,51 | \$ 400.051.556,88 | -\$ 3.519.379,71 | -\$ 22.816.754,61 | \$ 312.681.135,59 | -\$ 32.414.641,83 | \$ 453.682.453,65 |
| 21 | | \$ 144.056,98 | -\$ 135.296.931,04 | \$ 68.845.432,49 | \$ 419.741.398,77 | -\$ 3.708.722,34 | | \$ 349.581.177,88 | -\$ 32.357.098,07 | \$ 486.039.551,73 |
| 22 | | \$ 143.427,91 | -\$ 144.507.449,53 | \$ 72.232.507,52 | \$ 440.391.942,41 | -\$ 3.908.251,60 | | \$ 364.208.748,79 | -\$ 30.099.125,32 | \$ 516.138.677,05 |
| 23 | | \$ 142.798,84 | -\$ 154.317.410,97 | \$ 75.784.762,84 | \$ 462.049.568,26 | -\$ 4.118.515,54 | | \$ 379.398.404,59 | -\$ 27.995.032,69 | \$ 544.133.709,74 |
| 24 | | \$ 142.169,77 | -\$ 164.764.656,12 | \$ 79.510.168,18 | \$ 484.762.866,60 | -\$ 4.340.091,68 | | \$ 395.168.286,98 | -\$ 26.034.517,92 | \$ 570.168.227,65 |
| 25 | | \$ 141.540,70 | -\$ 175.889.362,35 | \$ 83.417.072,68 | \$ 508.582.741,08 | -\$ 4.573.588,61 | | \$ 411.536.862,80 | -\$ 24.207.959,04 | \$ 594.376.186,69 |
| 26 | | \$ 140.911,63 | -\$ 187.734.185,57 | \$ 87.514.222,69 | \$ 533.562.517,03 | -\$ 4.819.647,68 | | \$ 428.522.906,48 | -\$ 22.506.369,90 | \$ 616.882.556,60 |
| 27 | | \$ 140.282,56 | -\$ 200.344.410,56 | \$ 91.810.780,34 | \$ 559.758.054,64 | -\$ 5.078.944,72 | | \$ 446.145.479,70 | -\$ 20.921.358,67 | \$ 637.803.915,27 |
| 28 | | \$ 139.653,49 | -\$ 213.768.110,42 | \$ 96.316.342,92 | \$ 587.227.867,41 | -\$ 5.352.191,95 | | \$ 464.423.907,96 | -\$ 19.445.088,94 | \$ 657.249.004,20 |
| 29 | | \$ 139.024,42 | -\$ 228.056.315,51 | \$ 101.040.963,24 | \$ 616.033.245,92 | -\$ 5.640.139,87 | | \$ 483.377.753,78 | -\$ 18.070.243,38 | \$ 675.319.247,58 |
| 30 | | \$ 138.395,35 | -\$ 243.263.192,50 | \$ 105.995.170,83 | \$ 646.238.387,34 | -\$ 5.943.579,40 | -\$ 38.533.265,43 | \$ 464.493.520,84 | -\$ 15.503.829,38 | \$ 690.823.076,96 |

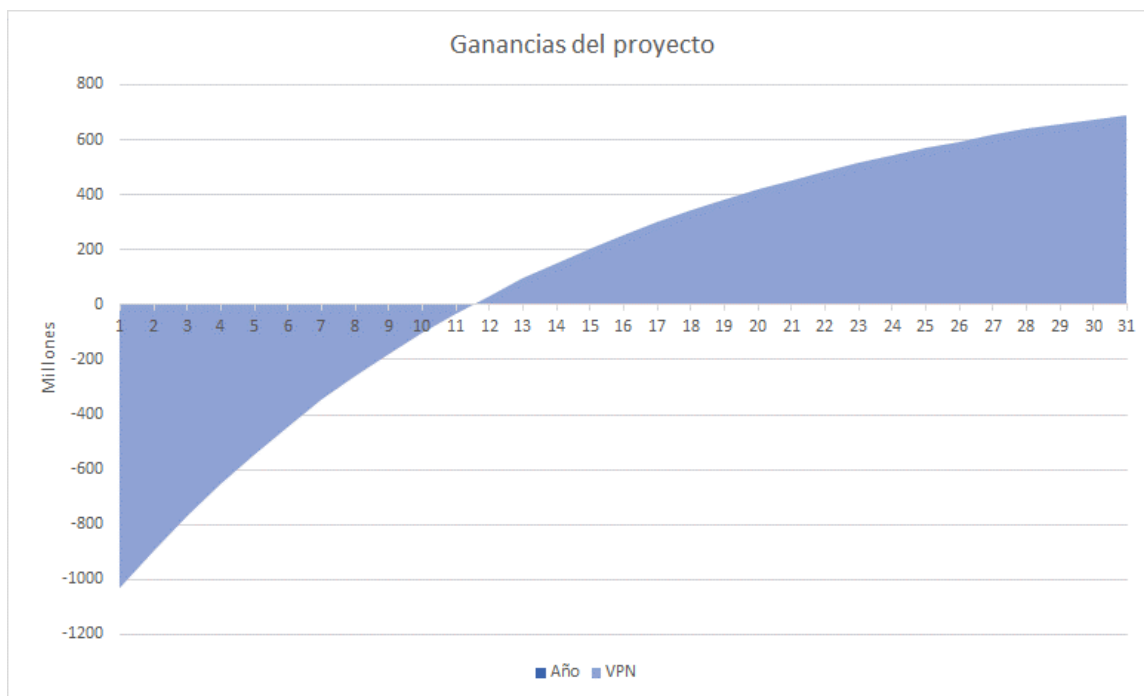


Figura 12. Diagrama económico costos y ganancias de proyecto a 30 años

Por medio de la tabla 10 podemos apreciar los costos y ganancias por año del proyecto, en donde se tienen en cuenta el costo inicial de la inversión, costo de la energía suministrada por la red, así como el costo de la energía inyectada a la red, costo de la

energía ahorrado por el sistema fotovoltaico, costos de mantenimiento y reacondicionamiento. Es importante ver como el sistema podría generar balances netos cercanos al cero para la población, dependiendo si el precio de KWh pagado fuera del 50% o más, ya que la producción inyectada a la red es aproximadamente el doble de la suministrada, para este ejercicio se asumió del 40%, por lo que en el primer año deben pagar un aproximado de \$8.400.000 COP entre las 30 familias que conforman la vereda Doche, es importante mencionar que los mantenimientos podrán llegar a descontarse con la respectiva capacitación de la comunidad en mantenimiento y limpieza de paneles solares.

La figura 12 muestra la columna de VPN contra el tiempo, permitiendo visualizar que desde el año 11 del proyecto, se cubre la totalidad de la inversión inicial, iniciando con ganancias de \$31.705.185 COP. Esto se logra gracias a los beneficios brindados por el consumo de la energía solar fotovoltaica con la finalidad de contar con el recurso hídrico para irrigar 90 hectáreas de tierras cultivables. Al final de proyecto se obtienen una ganancia de \$ 690.823.077 COP. Es importante resaltar que la finalidad de este proyecto se basa en el desarrollo sostenible para la vereda Doche, en donde el recurso hídrico es de vital importancia para el desarrollo de prácticas agrícolas que beneficien económicamente, minimizando la huella de carbono, lo que lleva a este proyecto a ser viable desde el punto de vista de inversionistas públicos o privados, que bajo convocatorias busquen apoyar proyectos que mejoren las condiciones de vida de poblaciones no conectadas.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

La vereda Doche, por pertenecer al desierto de la Tatacoa cuenta con condiciones favorables para el uso de la energía solar fotovoltaica para fines de riego y otras demandas de energía eléctrica, por contar con alta energía solar disponible, es importante mencionar que proyectos de este tipo amplían el desarrollo de estas tecnologías como estrategias de energía verde para aumentar la producción de alimentos, basada en la agricultura de riego y como fuente alternativa para minimizar los altos índices de falta de acceso a la electricidad, junto con la mejora de condición social y económica para zonas que no cuentan con la tecnología apropiada y limpia.

Se determinó que la necesidad de agua de uso residencial y agrícola de 90 hectáreas para los residentes de la vereda Doche equivale a 2.926 m³/día, para satisfacer este requerimiento se necesita un suministro de 801gpm de agua por un periodo de 8 horas/día para mantener el reservorio lleno cada dos días, mediante dos bombas en paralelo de 3500rpm de potencia consumida nominal de 29KW (Consumo total de 58KW). Esta necesidad se puede cubrir con un sistema solar fotovoltaico conectado a la red con capacidad de 144KWp, para llegar a esta potencia se necesitan 240 paneles de 600Wp y 2 Inversores de 60 kW, este sistema se encuentra sobredimensionado a fin de reducir el consumo de red a un 17,4%, equivalentes a 91,1kWh y que a su vez inyectará 176,7kWh a la red, con esto se pretende equiparar el costo total, lo que dependerá del precio de inyección a la red. Este sistema de bombeo de agua alimentado por energía solar además de suministrar el recurso hídrico protege el medio ambiente de la contaminación por quema de combustibles fósiles y reducción de ruido por bombas eléctricas de larga vida útil.

El sistema acoplado de dos bombas en paralelo utilizado para satisfacer la demanda de agua está en la capacidad de generar un suministro variable o regulado según la demanda o generación eléctrica, por medio de una progresiva entrada en funcionamiento, es decir que, en caso de no generar energía suficiente, solo funcionará una bomba que consume la mitad de potencia requerida (29KW) y un bombeo equivalente a 400,7gpm, lo que

permitirá operar el sistema inclusive a condiciones no favorables de energía solar o según requerimientos.

Otro aspecto importante es que la energía producida por el sistema solar fotovoltaico cuenta con excedentes que a futuro podrán ser utilizados en otros procesos asociados a la producción agrícola, un ejemplo de estos es la producción de derivados del cacao que ha sido galardonado con el primer lugar del concurso departamental de calidad “Cacao selecto del Huila” realizado en septiembre del 2023 y que en la actualidad representa una fuente de ingresos para la comunidad con alto potencial.

La evaluación financiera permite visualizar que la inversión inicial al año 2024 es de \$1.028.302.746,20 COP y que al año 11 de ejecución del proyecto se cubre con la totalidad de la inversión inicial, iniciando con ganancias de \$31.705.185 COP, finalizando con una ganancia neta de \$690.823.077 COP a los 30 años de vida útil del proyecto, este beneficio se centra en el ahorro energético, siendo su principal aprovechamiento el desarrollo sostenible para la comunidad de la región. Es importante mencionar que el sistema fotovoltaico será evaluado al final de la vida útil con el fin de verificar si aún se encuentra en condiciones favorables de generación de energía fotovoltaica.

Es importante resaltar que la finalidad de este proyecto es la mejora de las condiciones de vida de la población de la vereda Doche, basado en el desarrollo sostenible, en donde el recurso hídrico es de vital importancia para el desarrollo de prácticas agrícolas que beneficien económicamente a la población, minimizando la huella de carbono, lo que llevaría a este proyecto ser viable desde el punto de vista de donaciones de fondos públicos o aportes del sector privado que bajo convocatorias cuenten con fondos suficientes para apoyar proyectos de carácter social, económico y ambiental.

Referencias

- [1] c. Huila, «En Villavieja se produce chocolate orgánico de excelente calidad,» 8 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://www.huila.gov.co/publicaciones/12618/en-villavieja-se-produce-chocolate-organico-de-excelente-calidad/>. [Último acceso: 2 Febrero 2024].
- [2] L. Herrera y A. Solorzano, «Planteamiento de una alternativa energetica renovable para el sistema de bombeo de agua en las camaroneras de ecuador enfocado en el consumo de diésel y su impacto ambiental,» Quito , 2017.
- [3] R. J.Chilundo, D. Neves y U. S. Mahanjane, «Photovoltaic water pumping systems for horticultural crops irrigation: Advancements and opportunities towards a green energy strategy for Mozambique,» *elsevier*, pp. 61-68, 2019.
- [4] Sariyusda, «Design of solar powered water pump system for medium service level of quality drinking water in southwest aceh district indonesia,» *Revista internacional de investigación y tecnología de ingeniería (IJERT)*, p. 5, 2021.
- [5] ONU, «Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos,» Naciones Unidas, [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>. [Último acceso: 22 Abril 2023].
- [6] M. Hammad y E. Munzer, «Comparative economic viability and environmental impact of PV, diesel and grid systems for large underground water pumping application (55 wells) in Jordan,» *Renewable Wind, Water and Solar*, 2015.
- [7] H. Crece, «Gobernacion del Huila,» Gobernacion del Huila, 29 Soetiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.huila.gov.co/publicaciones/14360/villavieja-y-rivera-se-alzaron-con-los-primeros-lugares-del-concurso-departamental-de-calidad-cacao-selecto-del-huila/#:~:text=Secundino%20Calder%C3%B3n%20cacaocultor%20de%20la,29%20de%20septiembre%20de%202020>. [Último acceso: 18 Noviembre 2023].
- [8] Radionacional, «“Tatacao”, el dulce cacao que se cultiva en el desierto del Huila,» 22 Agosto 2022. [En línea]. Available: <https://www.radionacional.co/actualidad/campo-colombiano/cultivos-de-cacao-en-el-desierto-de-la-tatacoa-en-el-huila>. [Último acceso: 22 Mayo 2024].
- [9] Minenergía, «Energías renovables garantizan energía firme en el Sistema Interconectado Nacional para el periodo de vigencia 2027 y 2028,» Ministerio de energia Colombia, 16 Febrero 2024. [En línea]. Available: <https://www.minenergia.gov.co/es/sala-de-prensa/noticias-index/energ%C3%ADas-renovables-garantizan-energ%C3%ADa-firme-en-el-sistema-interconectado-nacional-para-el-periodo-de-vigencia-2027-y-2028/>. [Último acceso: 07 Julio 2024].
- [10] J. Green, «Solar Water Pumps Technical, Systems, And Business Model Approaches To Evaluation,» *Instituto de Tecnología de Massachusetts, Cambridge, Massachusetts*, p. 32, 2017.

- [11] O. Shepovalova, A. Belenov y S. Chirkov, «Review of photovoltaic water pumping system research,» *El Sevier*, pp. 306-324, 2020.
- [12] I. Aguaded, «Diseño de una instalacion solar fotovoltaica para el suministro de energia electrica de una vivienda unifamiliar en la provincia de Huelva,» Huelva (España), 2018.
- [13] B. Belmahdia y Abdelmajid, «Solar Potential Assessment using PVsyst software in the Northern zone of Morocco,» *Elsevier*, vol. 46, n° 46, p. 738–745, 2020.
- [14] F. Wang, R. Li, G. Zhao, D. Xia y W. Wang, «Simulation test of 50 MW grid-connected “Photovoltaic+Energy storage” system based on pvsyst software,» *Elsevier*, vol. 22, n° 102331, 2024.
- [15] R. Ayodele, A. Samson y O. Anuoluwa, «Evaluation of solar powered water pumping system: the case study of three selected Abattoirs in Ibadan, Nigeria,» *International Journal of Sustainable Engineering*, pp. 58-69, 2018.
- [16] J. D. R. Casarrubia, «Implementación de un sistema de bombeo de agua, alimentado con energía solar en la Universidad de Córdoba - Colombia,» *In Vestigium Ire VOL. 15-1*, pp. 105-120, 2021.
- [17] R. E. L. Peralta, «La energia solar fotovoltaica como factor de desarrollo en zonas rurales de Colombia,» Bogotá, 2011.
- [18] Eeri, «Arcgis Resources,» 2023. [En línea]. Available: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n0000000v000000.htm#:~:text=ArcGIS%20Online%20es%20un%20sistema,este%20contenido%20con%20los%20usuarios..> [Último acceso: 02 Noviembre 2023].
- [19] v. y. d. t. MInisterio de medio ambiente, «GUIA RAS - 001,» de *Definicion del nivel de complejidad y evaluacion de la poblacion, la dotacion y la demanda de agua*, Bogota, Pabamericana formas e impresos S.A., 2003.
- [20] G. Julian y A. Supelano, «Programa de uso eficiente y ahorro de agua PUEAA del distrito de riego de la vereda el Doche, Villavieja, Huila,» N.R., Neiva, 2019.
- [21] Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, *Resolucion 0330*, Bogota, 2017.
- [22] L. A. Aguilar Roldan, *Mecanica de Fluidos*, Medellin, 2009.
- [23] H. Vömel, «Saturation vapor pressure formulations,» National Center for Atmospheric Research, 7 Diciembre 2016. [En línea]. Available: [https://sciencepolicy.colorado.edu/~voemel/vp.html#:~:text=Goff%20Gratch%20equation%20\(Smithsonian%20Tables%2C%201984%2C%20after,in%20\[K\]%20and%20ew%20in%20\[hPa\].%20\[1\].](https://sciencepolicy.colorado.edu/~voemel/vp.html#:~:text=Goff%20Gratch%20equation%20(Smithsonian%20Tables%2C%201984%2C%20after,in%20[K]%20and%20ew%20in%20[hPa].%20[1].) [Último acceso: 26 Marzo 2024].
- [24] G. S. Atlas, «Global Solar Atlas,» Desconocido, 2023. [En línea]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map>. [Último acceso: 2 Noviembre 2023].
- [25] A. Tarquin , «Valor presente neto,» de *Ingenieria economica*, Mc Graw Hill, 1994, p. 546.
- [26] IDEAM, «Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos,» N.R.. [En línea]. Available: chrome-

- extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc. [Último acceso: 20 abril 2024].
- [27] DANE, «Departamento administrativo nacional de estadística,» DANE, 27 Enero 2022. [En línea]. Available: <https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/513>. [Último acceso: 6 Enero 2024].
- [28] B. Akane, «Necesidades de agua y riego del cacao,» Wikifarmer, N.R.. [En línea]. Available: <https://wikifarmer.com/es/necesidades-de-agua-y-riego-del-cacao/>. [Último acceso: 12 Febrero 2024].
- [29] Landatusolar, «Como Calcular la evaporacion del agua,» Landatu, 26 Diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://landatusolar.com/evaporacion-de-agua/#:~:text=EI%20coeficiente%20de%20evaporaci%C3%B3n%20es,%2C1%20a%200%2C3..> [Último acceso: 7 Julio 2024].
- [30] «Resolucion 0330 de 08 de junio 2017,» de *Reglamento tecnico para el sector de agua potable y saneamiento basico - RAS*, Bogota, 2017.
- [31] M. Perez, «Funcionamiento de bombas rotadinas,» de *Funcionamiento de bombas rotadinas*, Medellin, Facultad de minas UNAL, pp. 84-105.
- [32] Flowguard, «Importancia del diametro interno en la tuberia de agua potable,» Flowguard, 12 Enero 2024. [En línea]. Available: <https://www.flowguard.com/blog-sp/importancia-diametro-interno-en-la-tuberia-de-agua-potable>. [Último acceso: 07 Julio 2024].
- [33] Global solar atlas, «Report generated: 25 Mar 2024 Villavieja,» 2024.
- [34] J. solar, «Tiger Neo N-type 78HL4-BDV 590-610 Watt,» N.R., China, 2021.
- [35] A. Santillan, «Estudio de la incorporación de baterías en sistemas fotovoltaicos,» Universidad de Barcelona, Barcelona, 2016.
- [36] Electrohuila, «Contrato de condiciones uniformes (CCU), para la prestación del servicio público domiciliario de energía eléctrica,» Electrohuila, Neiva, 2021.
- [37] Banco de la republica de Colombia, «Banco de la republica de Colombia,» 24 Julio 2024. [En línea]. Available: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/indice-precios-consumidor-ipc#:~:text=EI%20%C3%ADndice%20de%20precios%20al,relaci%C3%B3n%20con%20un%20per%C3%ADodo%20base..> [Último acceso: 14 Julio 2024].
- [38] B. Bharathiraja, T. Sudharsanaa y A. Bharghavi, «Biohydrogen and Biogas—An overview on feedstocks and enhancement process,» *Fuel*, vol. 185, pp. 810-828, 2016.
- [39] Z. Csereklyei, Q. Songze y T. Ancev, «The effect of wind and solar power generation on wholesale electricity prices in Australia,» *Energy Policy*, vol. 131, pp. 358-369.
- [40] J. A. Arboleda G., Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades., Medellín, Colombia, 2008.

- [41] F. Gutierrez, S. Arias y D. Cardona, «Cavitación Hidrodinámica: un Enfoque desde la Ingeniería y la Agroindustria,» *Scientia Et Technica*, vol. 24, pp. 283-304, 2019.
- [42] Organización para las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, *Evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar*, FAO, pp. 87-157.
- [43] G. S. Atlas, «Solar database and PV software,» Solar database and PV software, N.R., 2024.
- [44] J. Gomez y S. Supelano, «Programa de uso eficiente y ahorro de agua- PUEAA del distrito de riego de la vereda de el Doche, Villavieja , Huila,» 2020.

APÉNDICE A – SISTEMA INDEPENDIENTE

Proyecto: Sistema Doche Independiente
 Variante: Nueva variante de simulación

Physys V7.3.1
 V10, Fecha de simulación:
 18/04/2021 11:42
 con V7.3.1

Resumen del proyecto

| | | |
|-------------------------|--------------------|----------------------------|
| Sitio geográfico | Situación | Configuración del proyecto |
| Boquerón | Latitud 3.29 °N | Albedo 0.20 |
| Colombia | Longitud -75.07 °W | |
| | Altitud 447 m | |
| | Zona horaria UTC-5 | |

Datos medio
 Paneles Solares Doche
 Meteorom 8.1 (2016-2021), Sat=100% (Modified by user) - Sintético

Resumen del sistema

| | |
|------------------------------|---|
| Sistema independiente | Sistema independiente con baterías |
| Orientación campo FV | Necesidades del usuario |
| Plano fijo | Consumidores domésticos diarios |
| Inclinación/Azmut 7.5 / 0 ° | Constante durante el año |
| | Promedio 454 kWh/Día |

Información del sistema

| | | |
|------------------------------|-------------------------------|--|
| Generador FV | Paquete de baterías | |
| Núm. de módulos 236 unidades | Tecnología Lithium ion, LFP | |
| Prom total 142 kWp | Núm. de unidades 224 unidades | |
| | Voltaje 51 V | |
| | Capacidad 11312 Ah | |

Resumen de resultados

| | | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| Energía disponible 232583 kWh/año | Producción específica 1542 kWh/kWpaño | Proporción rend. PR 60.16 % |
| Energía usada 165927 kWh/año | | Fracción solar (SF) 97.97 % |

Resumen del proyecto

| | | |
|-------------------------|--------------------|----------------------------|
| Sitio geográfico | Situación | Configuración del proyecto |
| Boquerón | Latitud 3.29 °N | Albedo 0.20 |
| Colombia | Longitud -75.07 °W | |
| | Altitud 447 m | |
| | Zona horaria UTC-5 | |

Datos medio
 Paneles Solares Doche
 Meteorom 8.1 (2016-2021), Sat=100% (Modified by user) - Sintético

Características del generador FV

| | | |
|-----------------------------------|--|--|
| Módulo FV | Batería | |
| Fabricante Jinkosolar | Fabricante Victron Energy | |
| Modelo JKM-600N-78HL4-BOV | Modelo LFP-CB 12.8V / 230Ah | |
| (Base de datos PVsyst original) | Tecnología Litium-ion, LFP | |
| Unidad Nom. Potencia 600 Wp | Núm. de unidades 56 en paralelo x 4 en series | |
| Número de módulos FV 236 unidades | Descarga mín. SOC 10.0 % | |
| Normal (STC) 142 kWp | Energía almacenada 598.7 kWh | |
| Módulos 118 Cadenas x 2 En series | Características del paquete de baterías | |
| En cond. de funcionam. (50°C) | Voltaje 51 V | |
| Prisp 131 kWh | Capacidad nominal 11312 Ah (C10) | |
| U nsp 84 V | Temperatura Fijo 20 °C | |
| I mpp 1559 A | | |

Controlador

| | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Controlador universal | Control de gestión de la batería |
| Tecnología Convertidor MPPT | Comandos de umbral como Cálculo SOC |
| Coef. temp. -5.0 mV/°C/Elem. | Cargando SOC = 0.98 / 0.80 |
| Convertidor | Descarga SOC = 0.10 / 0.35 |
| Eficiencia máxi y EURO 97.0 / 95.0 % | |

Pérdidas del conjunto

| | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| Pérdidas de senciad del conjunto | Factor de pérdida térmica | Pérdidas de cableado CC |
| Frac. de pérdida 3.0 % | Temperatura módulo según irradiancia | Res. conjunto global 0.88 mΩ |
| | Uv (viento) 0.0 W/m²/mvs | Frac. de pérdida 1.5 % en STC |

Pérdidas de diodos serie

| | | |
|-------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Caida de tensión 0.7 V | Pérdida de calidad módulo | Pérdidas de desajuste de módulo |
| Frac. de pérdida 0.8 % en STC | Frac. de pérdida -0.8 % | Frac. de pérdida 0.6 % en MPP |

Pérdidas de desajuste de cadenas

| |
|------------------------|
| Frac. de pérdida 0.1 % |
|------------------------|

| | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 000 | 0 200 | 0 300 | 0 400 | 0 500 | 0 600 | 0 700 | 0 800 | 0 900 | 0 000 |
| 0. | 30. | 60. | 90. | 120. | 150. | 180. | 210. | 240. | 270. |

Módulo de control de carga

Definición del horizonte

Horizon from PVGIS website API, Lat=3°17'38", Long=-75°4'9", Alt=447m

| | |
|-----------------------|--------------------------|
| Altura promedio 4.9 ° | Factor Albedo 0.83 |
| Factor difuso 0.99 | Fracción de albedo 100 % |

Perfil del horizonte

| | | | | | | | | | | | |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Azmut [°] | -180 | -173 | -165 | -158 | -150 | -143 | -135 | -128 | -120 | -113 | -105 |
| Altura [°] | 11.1 | 11.1 | 9.9 | 8.4 | 6.5 | 4.6 | 2.7 | 3.4 | 3.8 | 3.1 | 3.1 |
| Azmut [°] | -98 | -90 | -80 | -53 | -45 | -38 | -30 | -23 | -15 | -8 | 0 |
| Altura [°] | 2.7 | 3.4 | 3.4 | 4.2 | 4.2 | 3.8 | 3.8 | 3.4 | 2.7 | 2.7 | 2.3 |
| Azmut [°] | 15 | 23 | 30 | 38 | 45 | 53 | 60 | 68 | 83 | 90 | 98 |
| Altura [°] | 2.3 | 3.1 | 3.1 | 3.4 | 4.2 | 5.7 | 6.5 | 6.9 | 6.9 | 6.5 | 7.3 |
| Azmut [°] | 105 | 113 | 120 | 128 | 135 | 143 | 150 | 158 | 165 | 173 | 180 |
| Altura [°] | 7.6 | 7.3 | 6.5 | 5.3 | 1.9 | 1.9 | 3.8 | 5.7 | 8.0 | 9.2 | 11.1 |

Recorridos solares (diagrama de altura / azimut)

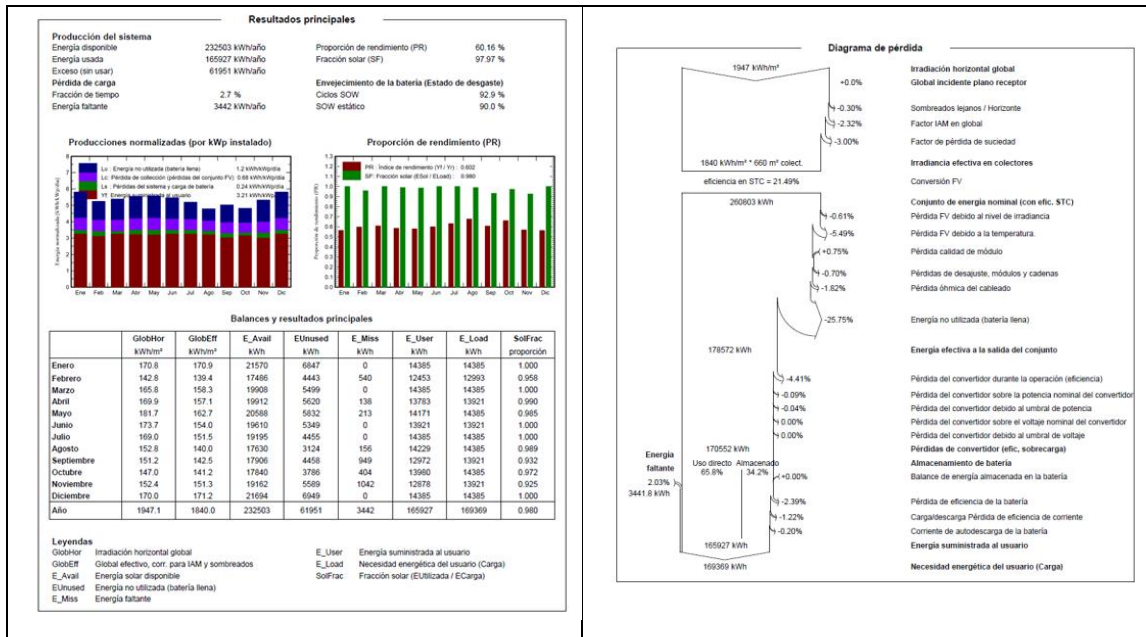
Plano fijo, inclinación, 8°/0°

Necesidades detalladas del usuario

Consumidores domésticos diarios, Constante durante el año, promedio = 454 kWh/Día

| Valores anuales | | Uso | | Energía |
|------------------------|----------|-----------|--------|---------|
| Núm. | Potencia | Horas/día | Wh/día | Wh/día |
| | W | | | 0.0 |
| Bombas | 2 | 20000 h/a | 24.0 | 464024 |
| Consumidores en espera | | | 24.0 | 24 |
| Energía diaria total | | | | 464024 |

Distribución por hora



APÉNDICE B

Proyecto: Proyecto Doche 142 KWp
Variante: Nueva variante de simulación1.1

Resumen del proyecto

| | | |
|--------------------------|--|-----------------------------------|
| Sitio geográfico | Situación | Configuración del proyecto |
| Vereda Doche Columbia | Latitud: 3.29 °N Longitud: -75.07 °W Altitud: 447 m Zona horaria: UTC-5 | Albedo: 0.20 |

Datos metro
Pantales Solares Doche
Meteonorm 8.1 (2016-2021), Sat=100% - Sinéctico

Resumen del sistema

| | | |
|--|--|--|
| Sistema conectado a la red | Sin escena 3D definida, sin sombras | Necesidades del usuario |
| Orientación campo FV Plano fijo Inclinación/Azmut: 7.5 / 0 ° | Sombreados cercanos Sin sombreados | Perfil diario Constante durante el año Promedio: 522 kWh/Día |

Información del sistema

| | |
|--|---|
| Generador FV Núm. de módulos: 96 unidades Prom total: 57.6 kWp | Inversores Núm. de unidades: 1 unidad Prom total: 50.0 kWca Proporción Prom: 1.152 |
|--|---|

Resumen de resultados

| | | |
|----------------------------------|---|------------------------------|
| Energía producida: 89139 kWh/año | Producción específica: 1548 kWh/kWp/año | Proporción rend. PR: 79.45 % |
| Energía usada: 190530 kWh/año | | Fracción solar (SF): 44.08 % |

Características del generador FV

| | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Módulo FV | JinkoSolar | Inversor | Power Electronics |
| Fabricante | JKM-600N-78HL4-BDV | Fabricante | FreeSun FS0650 LVT |
| Modelo | (Base de datos PVsyst original) | Modelo | (Base de datos PVsyst original) |
| Unidad Nom. Potencia | 600 Wp | Unidad Nom. Potencia | 50.0 kWca |
| Número de módulos FV | 96 unidades | Número de inversores | 1 unidad |
| Nominal (STC) | 57.6 kWp | Potencia total | 50.0 kWca |
| Módulos | 8 Cadenas x 12 En serie | Voltaje de funcionamiento | 450-620 V |
| En cond. de funcionamiento (50°C) | | Proporción Prom (CC/CA) | 1.15 |
| Temperatura | 53.3 kWp | | |
| U rmp | 505 V | | |
| I rmp | 106 A | | |

Potencia FV total

| | | | |
|-----------------|------------|------------------------------------|----------|
| Nominal (STC) | 58 kWp | Potencia total del inversor | 50 kWca |
| Total | 96 módulos | Potencia total | 50 kWca |
| Área del módulo | 296 m² | Número de inversores | 1 unidad |
| | | Proporción Prom | 1.15 |

Pérdidas del conjunto

| | | |
|--|---|---|
| Pérdidas de suciedad del conjunto | Factor de pérdida térmica | Pérdidas de cableado CC |
| Frac. de pérdida: 3.0 % | Temperatura módulo según irradiación Uc (const): 20.0 W/m²K Uv (viento): 0.0 W/m²km/s | Res. conjunto global: 76 mΩ Frac. de pérdida: 1.5 % en STC |

Pérdidas de calidad módulo

| | | |
|--------------------------|--|---|
| Frac. de pérdida: -0.8 % | Pérdidas de desajuste de módulo | Pérdidas de desajuste de cadenas |
| | Frac. de pérdida: 2.0 % en MPP | Frac. de pérdida: 0.1 % |

Factor de pérdida IAM
Efecto de incidencia (IAM): Fresnel, revestimiento AR, n(vitrío)=1.526, n(AR)=1.290

| | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0° | 30° | 60° | 60° | 75° | 80° | 85° | 90° |
| 1.000 | 0.999 | 0.987 | 0.962 | 0.892 | 0.816 | 0.681 | 0.440 |

Pérdidas de cableado CA

Línea de salida del inv. hasta el punto de inyección
Voltaje inversor: 400 Vca tri
Frac. de pérdida: 3.37 % en STC
Inversor: FreeSun FS0650 LVT
Sección cables (1 Inv.): Cobre 1 x 3 x 25 mm²
Longitud de los cables: 130 m

Parámetros generales

Sistema conectado a la red

Orientación campo FV
Plano fijo
Inclinación/Azmut: 7.5 / 0 °

Horizonte
Altura promedio: 4.9 °

Configuración de cobertizos
Sin escena 3D definida

Modelos usados
Transposición: Pnnet
Dilatación: Pnnet, Meteonorm
Circunsolar: separado

Necesidades del usuario
Perfil diario
Constante durante el año
Promedio: 522 kWh/Día

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|----|
| Carga por hora | 0h | 1h | 2h | 3h | 4h | 5h | 6h | 7h | 8h | 9h | 10h | 11h | kW |
| | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | kW |
| | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | kW |

Necesidades detalladas del usuario

Perfil diario, Constante durante el año, promedio = 522 kWh/día

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|----|
| Carga por hora | 0h | 1h | 2h | 3h | 4h | 5h | 6h | 7h | 8h | 9h | 10h | 11h | kW |
| | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | kW |
| | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | kW |

Perfil diario

Resultados principales

| | |
|---|--|
| Producción del sistema Energía producida: 89139 kWh/año Energía usada: 190530 kWh/año | Producción específica: 1548 kWh/kWp/año Proporción de rendimiento (PR): 79.45 % Fracción solar (SF): 44.08 % |
|---|--|

Producciones normalizadas (por kWp instalado)

Proporción de rendimiento (PR)

Balances y resultados principales

| | GlobHor | DifHor | T_Amb | GlobEIT | E_Array | E_User | E_Solar | E_Grid | EFGrid | |
|------------|---------|--------|-------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|--------|
| | kWh/m² | kWh/m² | °C | kWh/m² | kWh | kWh | kWh | kWh | kWh | |
| Enero | 170.8 | 63.73 | 24.17 | 180.3 | 8763 | 16182 | 7791 | 422.9 | 8391 | |
| Febrero | 142.8 | 64.83 | 24.46 | 147.1 | 1394.4 | 7141 | 14616 | 6367 | 327.0 | 8249 |
| Marzo | 162.7 | 73.54 | 24.28 | 187.0 | 1682.0 | 8123 | 16182 | 7214 | 399.5 | 8958 |
| Abril | 169.9 | 75.26 | 23.71 | 166.4 | 1570.0 | 8120 | 15660 | 7176 | 451.0 | 8484 |
| Mayo | 181.7 | 64.40 | 24.10 | 173.0 | 1627.0 | 8405 | 16182 | 7420 | 471.7 | 8782 |
| Junio | 173.7 | 69.87 | 23.86 | 183.9 | 1540.0 | 8017 | 15860 | 7114 | 426.3 | 8546 |
| Julio | 169.0 | 76.42 | 24.69 | 181.0 | 1515.0 | 7866 | 16182 | 6994 | 416.4 | 9188 |
| Agosto | 152.8 | 78.27 | 24.72 | 148.5 | 1400.0 | 7250 | 16182 | 6461 | 354.5 | 9721 |
| Septiembre | 151.2 | 67.80 | 24.14 | 150.9 | 1425.0 | 7332 | 15660 | 6424 | 451.7 | 9236 |
| Octubre | 147.0 | 81.22 | 23.85 | 149.5 | 1412.0 | 7319 | 16182 | 6381 | 497.0 | 9601 |
| Noviembre | 152.4 | 64.84 | 23.31 | 159.8 | 1513.0 | 8111 | 15660 | 6825 | 501.6 | 8835 |
| Diciembre | 170.0 | 64.41 | 23.87 | 180.5 | 1713.0 | 8815 | 16182 | 7820 | 441.6 | 8362 |
| Año | 1947.1 | 844.69 | 24.08 | 1947.8 | 1839.9 | 94962 | 190530 | 83976 | 5163.1 | 106554 |

Legendas

- GlobHor: Irradiación horizontal global
- DifHor: Irradiación difusa horizontal
- T_Amb: Temperatura ambiente
- GlobInc: Global incidente plano receptor
- GlobEIT: Global efectivo, corr. para IAM y sombreados
- E_Array: Energía efectiva a la salida del conjunto
- E_User: Energía suministrada al usuario
- E_Solar: Energía del sol
- E_Grid: Energía inyectada en la red
- EFGrid: Energía de la red

Diagrama de pérdida

1947 kWh/m²
1840 kWh/m² * 268 m² colect.
eficiencia en STC = 21.49%

106087 kWh
94969 kWh
90845 kWh
83976 kWh
5163 kWh

Despacho: usuario y reinyección de red

12 x JKM-600N-78HL4-BDV
8 Cadenas

Inversor (50 kVA)

Punto de inyección

APÉNDICE C

Proyecto: Proyecto Doche 144 kWp
 Variante: Nueva variante de simulación 1.1

Resumen del proyecto

| | | |
|---|--|---|
| Sitio geográfico Vereda Doche Colombia | Situación Latitud: 3.29 °N Longitud: -75.07 °W Altitud: 447 m Zona horaria: UTC-5 | Configuración del proyecto Albedo: 0.20 |
|---|--|---|

Datos meteo
 Paneles Solares Doche
 Meteorom 8.1 (2016-2021), Sat=100% - Simético

Resumen del sistema

| | | |
|--|---|--|
| Sistema conectado a la red Orientación campo FV Plano fijo Incidencia/Azmut: 7.5 / 0 ° | Sin escena 3D definida, sin sombras Sombrados cercanos Sin sombrados | Necesidades del usuario Perfil diario Constante durante el año Promedio: 522 kWh/Día |
|--|---|--|

Información del sistema

| | | |
|--|--|--|
| Generador FV Núm. de módulos: 240 unidades Prom total: 144 kWp | Inversores Núm. de unidades: 2 unidades Prom total: 120 kWca Proporción Prom: 1.200 | |
|--|--|--|

Resumen de resultados

| | | |
|-----------------------------------|--|------------------------------|
| Energía producida: 221773 kWh/año | Producción específica: 1540 kWh/Wp/año | Proporción rend. PR: 79.07 % |
| Energía usada: 190530 kWh/año | | Fracción solar (SF): 82.55 % |

Parámetros generales

Sistema conectado a la red: Sin escena 3D definida, sin sombras

| | | |
|---|--|---|
| Orientación campo FV Orientación Plano fijo Incidencia/Azmut: 7.5 / 0 ° | Configuración de cobertizos Sin escena 3D definida | Modelos usados Transposición: Perez Difusos: Perez, Meteorom Circunscular: separado |
|---|--|---|

Horizonte
 Altura promedio: 4.9 °

Sombreados cercanos
 Sin sombreados

Necesidades del usuario
 Perfil diario
 Constante durante el año
 Promedio: 522 kWh/Día

| Carga por hora | 0h | 1h | 2h | 3h | 4h | 5h | 6h | 7h | 8h | 9h | 10h | 11h |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | 12h | 13h | 14h | 15h | 16h | 17h | 18h | 19h | 20h | 21h | 22h | 23h |
| | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 |

kW

Características del generador FV

| | | |
|---|--|--|
| Módulo FV Fabricante: Jinkosolar Modelo: JKM-600N-78HL4-BDV (Base de datos PVyst original) Unidad Nom. Potencia: 600 Wp Número de módulos FV: 240 unidades Nominal (STC): 144 kWp Módulos: 20 Cadenas x 12 En series En cond. de funcionam. (50°C): Pmpp: 133 kWp U mpp: 505 V I mpp: 264 A | Inversor Fabricante: Power Electronics Modelo: FreeSun FS0060 LVT (Base de datos PVyst original) Unidad Nom. Potencia: 60.0 kWca Número de inversores: 2 unidades Potencia total: 120 kWca Voltaje de funcionamiento: 450-620 V Proporción Prom (CC:CA): 1.20 | |
|---|--|--|

Pérdidas de calidad módulo
 Frac. de pérdida: -0.8 %

Pérdidas de desajuste de módulo
 Frac. de pérdida: 2.0 % en MPP

Pérdidas de desajuste de cadenas
 Frac. de pérdida: 0.1 %

Factor de pérdida IAM
 Efecto de incidencia (IAM): Fresnel, revestimiento AR, n(vitrío)=1.526, n(AR)=1.200

| 0° | 30° | 50° | 60° | 70° | 75° | 80° | 85° | 90° |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.000 | 0.999 | 0.987 | 0.962 | 0.892 | 0.816 | 0.681 | 0.440 | 0.000 |

Parámetros generales

Sistema conectado a la red: Sin escena 3D definida, sin sombras

| | | |
|---|--|---|
| Orientación campo FV Orientación Plano fijo Incidencia/Azmut: 7.5 / 0 ° | Configuración de cobertizos Sin escena 3D definida | Modelos usados Transposición: Perez Difusos: Perez, Meteorom Circunscular: separado |
|---|--|---|

Horizonte
 Altura promedio: 4.9 °

Sombreados cercanos
 Sin sombreados

Necesidades del usuario
 Perfil diario
 Constante durante el año
 Promedio: 522 kWh/Día

| Carga por hora | 0h | 1h | 2h | 3h | 4h | 5h | 6h | 7h | 8h | 9h | 10h | 11h |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | 12h | 13h | 14h | 15h | 16h | 17h | 18h | 19h | 20h | 21h | 22h | 23h |
| | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 |

kW

Necesidades detalladas del usuario

Perfil diario. Constante durante el año, promedio = 522 kWh/día

| Carga por hora | 0h | 1h | 2h | 3h | 4h | 5h | 6h | 7h | 8h | 9h | 10h | 11h |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| | 12h | 13h | 14h | 15h | 16h | 17h | 18h | 19h | 20h | 21h | 22h | 23h |
| | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 | 58.0 |

kW

Perfil diario

Características del generador FV

| | | |
|---|--|--|
| Módulo FV Fabricante: Jinkosolar Modelo: JKM-600N-78HL4-BDV (Base de datos PVyst original) Unidad Nom. Potencia: 600 Wp Número de módulos FV: 240 unidades Nominal (STC): 144 kWp Módulos: 20 Cadenas x 12 En series En cond. de funcionam. (50°C): Pmpp: 133 kWp U mpp: 505 V I mpp: 264 A | Inversor Fabricante: Power Electronics Modelo: FreeSun FS0060 LVT (Base de datos PVyst original) Unidad Nom. Potencia: 60.0 kWca Número de inversores: 2 unidades Potencia total: 120 kWca Voltaje de funcionamiento: 450-620 V Proporción Prom (CC:CA): 1.20 | |
|---|--|--|

Pérdidas de calidad módulo
 Frac. de pérdida: -0.8 %

Pérdidas de desajuste de módulo
 Frac. de pérdida: 2.0 % en MPP

Pérdidas de desajuste de cadenas
 Frac. de pérdida: 0.1 %

Factor de pérdida IAM
 Efecto de incidencia (IAM): Fresnel, revestimiento AR, n(vitrío)=1.526, n(AR)=1.200

| 0° | 30° | 50° | 60° | 70° | 75° | 80° | 85° | 90° |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.000 | 0.999 | 0.987 | 0.962 | 0.892 | 0.816 | 0.681 | 0.440 | 0.000 |

12 x JKM-600N-78HL4-BDV
10 Cadenas

Inversor (60 kVA) 130.0 m

12 x JKM-600N-78HL4-BDV
10 Cadenas

Inversor (60 kVA) 130.0 m

Punto de inyección kWh

