

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE GENERACIÓN
FOTOVOLTAICA Y RECOLECCIÓN DE AGUA LLUVIA PARA
APLICACIONES AGROINDUSTRIALES**

**DISEÑO Y EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE
CAPTACIÓN, TRATAMIENTO Y ALMACENAMIENTO DE AGUA
LLUVIA PARA RIEGO EN LA CIUDAD DE QUITO**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

ESTEBAN DAVID CABRERA URBINA

esteban.cabrera@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ MSc. PhD.

santiago.vaca@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2023

CERTIFICACIONES

Yo, ESTEBAN DAVID CABRERA URBINA declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

ESTEBAN DAVID CABRERA URBINA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ESTEBAN DAVID CABRERA URBINA, bajo mi supervisión.

SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ESTEBAN DAVID CABRERA URBINA

SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ

DEDICATORIA

A mis padres y hermana, su constante apoyo me ha dado la fuerza y motivación necesarias para completar mis estudios.

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Politécnica Nacional, por ser mi casa de estudios y darme la oportunidad de desarrollarme académicamente.

A mi familia, por apoyarme durante mis estudios y proyectos personales.

A mi tutor Santiago Vaca, por su constante guía y retroalimentación que hizo posible la realización de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico.....	3
2 METODOLOGÍA.....	11
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	25
3.1 Resultados.....	25
3.2 Discusión de resultados.....	39
3.3 Conclusiones	39
3.4 Recomendaciones.....	41
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
5 ANEXOS	45

RESUMEN

El uso de paneles fotovoltaicos requiere el uso de grandes extensiones de terreno, lo que genera una competencia con las industrias agrícolas que utilizan el suelo como medio de producción. Una propuesta para solucionar este problema es la definición de sistemas agrivoltaicos, en los que se integran campos fotovoltaicos encima de los cultivos para ahorrar espacio y beneficiarse de la sombra.

Por su parte, para optimizar la utilización del suelo, los sistemas de agricultura pueden aumentar su rendimiento, pero para esto se requieren grandes cantidades de agua y energía.

El presente trabajo tiene el propósito de diseñar un sistema agrivoltaico que además pueda captar agua de lluvia. Con esto, el sistema puede ser capaz de cubrir las necesidades de riego en la industria agrícola y utilizar la energía solar fotovoltaica captada para cubrir el requerimiento eléctrico de la operación agrícola. Para esto, se ha diseñado un módulo de captación de agua de lluvia que utiliza paneles fotovoltaicos como superficie de captación y tiene una serie de canales que conducen el agua hasta un reservorio, donde se almacena para ser utilizada por el sistema de riego. También se ha diseñado un sistema de riego por goteo que se alimenta de la energía eléctrica producida por los paneles y distribuye el agua almacenada en el reservorio por todos los cultivos.

Se encontró que el arreglo utilizado de módulos de captación genera una cantidad de energía muy superior (70 [MWh] – 100 [MWh]) a la consumida por la bomba de agua del sistema de riego (0,024 [MWh]), por lo que se puede alimentar a la misma de forma continua durante todo el año. También, se comprobó que el sistema captura un volumen de agua suficiente (1470 m³) para cubrir la necesidad de riego de un cultivo de papas en la etapa final de su desarrollo (14,05 [m³/h]).

PALABRAS CLAVE: Agrivoltaico, Riego por goteo, Bomba de agua, Radiación solar, Agua de lluvia, Sistemas de captación

ABSTRACT

The use of photovoltaic panels requires the utilization of large land areas, which creates competition with agricultural industries that use the land as a means of production. On one hand, one of the proposals to solve this issue is the implementation of agrivoltaic systems, in which photovoltaic arrays are integrated above crops to save space and take advantage of the shade. On the other hand, the increase in agricultural system's yield will translate into an optimization of the land use, but this requires large amounts of water and energy.

The purpose of this study is to design an agrivoltaic system that can also collect rainwater. With this, the system can potentially fulfill irrigation needs in the agricultural industry and utilize the captured solar photovoltaic energy to meet the electrical requirements of the agricultural operation. To achieve this, a rainwater collection module has been designed, utilizing photovoltaic panels as the collection surface and featuring a series of channels that direct water to a reservoir, where it is stored for use by the irrigation system. Additionally, a drip irrigation system has been developed, powered by the electrical energy produced by the panels, distributing the stored water in the reservoir to all the crops.

It was found that the employed arrangement of collection modules generates a significantly higher amount of energy (70 [MWh] – 100 [MWh]) compared to the energy consumed by the water pump of the irrigation system (0.024 [MWh]), enabling continuous year-round operation. Furthermore, the system was observed to capture a sufficient volume of water (1470 m³) to meet the irrigation requirements of a potato crop in its late developmental stage (14.05 [m³/h]).

KEYWORDS: Agrivoltaic, Drip irrigation, Water pump, Solar radiation, Rainwater, Capture systems

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

La situación actual del mundo refleja un grave problema con respecto a la obtención de energía debido a que, en su mayoría, se obtiene de fuentes primarias fósiles. El uso de fuentes primarias fósiles como el petróleo y el carbón natural trae consigo graves problemas medioambientales y sociales muy conocidos como el calentamiento global, deforestación indiscriminada, desplazamiento de comunidades oriundas del lugar de extracción, entre otros [1].

Ante estos problemas, nace el concepto de “energías renovables” que ofrece disminuir el impacto de los mismos gracias a que son poco contaminantes (en términos de emisiones) y requiere un proceso de captación en lugar de una extracción agresiva con el medioambiente, como es el caso de las fuentes convencionales (fósiles). El término “renovable” hace referencia a la generación de energía utilizando fuentes primarias renovables como la biomasa, viento, mareas y el sol [2].

La energía solar debe ser la fuente renovable más conocida y difundida a nivel mundial junto a su dispositivo más famoso: el panel fotovoltaico. El uso de paneles fotovoltaicos trae todos los beneficios de las energías renovables, sin embargo, también trae consigo un problema que vale la pena considerar y es el uso del suelo. Así, paradójicamente, el uso de un recurso renovable (radiación solar) implica el uso de otro recurso no renovable (suelo), lo cual ha conducido a una competencia por este último, debido a que el suelo es un recurso indispensable para la industria agrícola, especialmente para el cultivo. Para resolver esta paradoja, se ha creado el concepto de “agrivoltaica” que consiste en combinar las actividades de generación de energía eléctrica con paneles fotovoltaicos y con la producción agrícola en el mismo espacio físico [3].

Los cultivos requieren de un suministro constante de agua para su crecimiento y desarrollo y esto hace necesaria la existencia de una fuente que se encuentre disponible en todo momento; una de estas fuentes es la lluvia. Las precipitaciones en la ciudad de Quito están presentes prácticamente todo el año, lo que presenta una oportunidad de obtener el suministro de agua constante mencionado anteriormente [4].

El componente desarrollado busca diseñar un sistema agrivoltaico de captación y uso de agua de lluvia con el propósito de cubrir una necesidad específica de riego en la industria agrícola ubicada en la ciudad de Quito. El tema busca evaluar si los recursos naturales disponibles en el lugar de estudio son suficientes para cubrir la necesidad establecida; para esto será necesario estimar la cantidad de agua que requiere el cultivo, la cantidad de agua lluvia que es capaz de captar el sistema, la cantidad de energía eléctrica que pueden

producir los paneles fotovoltaicos y la cantidad de energía que consume en su operación. Finalmente, se deben comparar estos indicadores para analizar en qué proporción el sistema cumple con sus objetivos.

1.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de aprovechamiento de agua de lluvia utilizando energía solar captada por un sistema agrivoltaico capaz de cubrir la necesidad total o parcial de riego en la industria agrícola.

1.2 Objetivos específicos

1. Identificar la cantidad de lluvia y energía solar que incide sobre la ciudad de Quito que se puede utilizar en un periodo de un año.
2. Determinar el método de irrigación y su respectivo caudal para regar una plantación semanalmente.
3. Dimensionar y seleccionar la bomba de agua, reservorio, accesorios y tuberías para movilizar el caudal requerido.
4. Estimar el porcentaje de energía eléctrica generada con paneles fotovoltaicos para cubrir una parte o la totalidad de la demanda energética de los elementos del sistema en un periodo mensual.

1.3 Alcance

El presente trabajo consiste en el diseño de un sistema agrivoltaico cuyo objetivo es recolectar y aprovechar el agua proveniente de las precipitaciones para solventar la necesidad de riego del cultivo en el que se ubica. Primero, se realizará una estimación de los recursos naturales disponibles de radiación solar y precipitación en base a datos obtenidos de la National Solar Radiation Database (NSRDB) y de la Secretaría del Ambiente, respectivamente. Se explorarán diferentes alternativas de captación de agua lluvia de acuerdo a su aplicación y los elementos que los constituyen, así como alternativas para el almacenamiento del agua lluvia captada y los criterios utilizados para su selección. También, se generó una propuesta para el uso de la energía generada por los paneles fotovoltaicos que alimenta un sistema de riego capaz de proporcionar el agua almacenada por el sistema de captación a los cultivos. En esta propuesta se describen el método de riego, los elementos que forman parte del sistema, su ubicación y cómo interactúan para cumplir su objetivo. Finalmente, se ha realizado una evaluación energética del sistema

propuesto con el fin de observar en qué proporción el sistema es capaz de cubrir las necesidades de energía eléctrica y cuánta cantidad de agua puede suministrar al cultivo.

1.4 Marco teórico

Energía solar

El sol es el centro del sistema solar, formado hace aproximadamente 6,5 mil millones de años y contiene el 99,8% de la masa del sistema solar [5]. En su interior se tienen condiciones extremas de presión y temperatura cuya intensidad da lugar a reacciones nucleares de fusión. El hidrógeno presente en el interior de la estrella es el objeto de estas reacciones, fusionándose para formar helio. En este proceso, el sol libera una cantidad gigantesca de energía en forma de radiación electromagnética. La radiación viaja a través del vacío del espacio hacia la atmósfera terrestre, donde se va disipando al entrar en contacto con la atmósfera hasta llegar a la superficie terrestre. A esta cantidad se le denomina irradiancia y está definida como la potencia (energía por unidad de tiempo) solar que incide sobre la superficie terrestre por unidad de área [6]. La radiación solar se distribuye en varios tipos de radiación como se muestra a continuación:

- **Radiación directa (DNI):** Este tipo de radiación no ha sufrido cambios, es decir, en todo el trayecto que ha viajado desde el sol hasta la superficie terrestre no ha interactuado con ningún elemento como nubes, edificaciones, montañas y vegetación. Por lo que no ha sufrido cambios de dirección y llega directamente del sol a la superficie del planeta [7].
- **Radiación difusa (DHI):** Esta clase se refiere a la radiación que ha interactuado con nubes, edificaciones, vegetación y montañas. Por esta razón, no tiene una dirección definida e incide sobre la superficie desde todas las direcciones distintas a la dirección de la radiación solar directa [7].
- **Radiación reflejada:** Es la radiación que es reflejada por una superficie; su cantidad depende del albedo, que indica qué porcentaje de la radiación original incidente es reflejada [7].

La suma de todos estos tipos de radiación solar se denomina radiación global (GHI). La cantidad de energía solar es tal que supera a la energía que se consume en todo el planeta tierra; es aproximadamente diez mil veces mayor [7]. El sol es el corazón de las energías renovables, ya que sin su existencia no se producirían los fenómenos en los cuales se basan. Por ejemplo, los vientos por efecto de la convección en la energía eólica y el crecimiento de la vegetación en el caso de la biomasa.

Existen dos formas de aprovechar el recurso solar: energía térmica y energía eléctrica. La primera consiste en generar calor utilizando colectores que capten la radiación solar, en especial la radiación solar directa, para transferirlo a un fluido de trabajo que normalmente es agua. En aplicaciones de baja temperatura, el agua es utilizada para usos domésticos como el consumo y aseo, mientras que en aplicaciones de alta temperatura el fluido de trabajo es utilizado en ciclos de potencia para generar energía eléctrica, típicamente en un ciclo Stirling. La segunda se basa en el uso de semiconductores para generar energía eléctrica directamente, como se describe en la siguiente sección.

Energía solar fotovoltaica

Se denomina energía solar fotovoltaica a la energía eléctrica generada a partir de la radiación solar de forma directa, es decir, sin realizar conversiones intermedias. Para esto, se utilizan paneles fotovoltaicos que son un conjunto de células solares [8]. La conversión de energía se realiza mediante el uso de materiales semiconductores; estos materiales son golpeados por fotones provenientes de la luz solar, lo que produce una corriente eléctrica. Dependiendo de la cantidad de paneles solares que se utilicen, la energía producida puede ser utilizada en aplicaciones de pequeña o gran escala, desde la alimentación de pequeños aparatos eléctricos en un hogar hasta la alimentación de equipos industriales.

Sistema agrivoltaico

Un sistema agrivoltaico es un sistema con doble propósito que consiste en el aprovechamiento del espacio físico ocupado por actividades agrícolas para instalar paneles fotovoltaicos con el fin de generar energía eléctrica. Los sistemas agrivoltaicos aparecen como una medida para contrarrestar un problema que involucra el uso de energías renovables de naturaleza solar, como la generación de energía con paneles fotovoltaicos, que es el uso del suelo. El suelo es un recurso no renovable, por lo que puede agotarse al someterlo a un consumo acelerado. Un ejemplo está en la instalación de paneles fotovoltaicos donde se requieren significativas cantidades de terreno, el cual todavía puede ser utilizado para otras actividades, especialmente para el cultivo. Debajo de los paneles solares hay espacio suficiente donde se puede ubicar cultivos destinados a la producción de alimentos; estos cultivos estarán bajo sombra, lo que resulta ventajoso ya que esta condición contribuye a reducir el consumo de agua y brinda protección al cultivo frente a temperaturas extremas que puedan dañarlo, aumentando su rendimiento. La presencia de plantas también tiene un impacto positivo sobre los paneles fotovoltaicos al disminuir su temperatura, lo que mejora su eficiencia que a su vez aumenta la cantidad de energía que pueden entregar y alarga su vida útil [3].

Fuentes de agua para la agricultura

El agua es un recurso valioso para una gran cantidad de aplicaciones tanto potables como no potables, por esta razón, su escasez representa un gran problema [9]. En la industria agrícola, el agua toma un papel fundamental en el riego de los cultivos ya que los mantiene vivos y permite su desarrollo para su cosecha. Es decir, el agua hace posible que el proceso clave de una empresa agrícola se lleve a cabo, y su escasez significa pérdidas millonarias para la misma. El agua proviene de diversas fuentes naturales, sin embargo, aquel que quiera acceder a ella debe tener una instalación de abastecimiento que movilice el agua de la fuente a su ubicación, por lo cual se paga un precio definido por la tarifa de agua que, en el caso de Quito, es establecida por la EPMAPS. Normalmente, una empresa no tiene problemas con esto ya que, al ser una organización relativamente grande, puede gestionar su conexión a la red pública de agua potable con el municipio local. Sin embargo, existe una alternativa diferente para obtener agua y consiste en capturar la misma de las lluvias. La lluvia es una fuente natural de agua que llega directamente al lugar donde el que la requiera puede aprovecharla de manera gratuita. Su uso es una práctica efectiva y representa un manejo adecuado de los recursos naturales disponibles, lo que le da a las organizaciones una mayor autonomía al utilizar sus propias capacidades y trabajo conjunto para implementar esta alternativa [10].

Sistema de captación de agua de lluvia

Los sistemas de captación de agua de lluvia son los mecanismos que hacen posible el aprovechamiento de la misma; sin estos, no se puede utilizar el agua de forma de lluvia de manera efectiva. Dichos sistemas consisten en un conjunto de componentes y accesorios con los cuales se realiza la recolección y almacenamiento del agua proveniente de las precipitaciones para su posterior uso. Dependiendo de su objetivo, el sistema de captación de agua de lluvia será diseñado con componentes y conexiones que hagan posible su realización. Existen dos categorías principales para estos sistemas:

- Sistemas para usos potables
- Sistemas para usos no potables [11]

La diferencia entre la primera categoría con la segunda es que, para usos potables, se requieren superficies limpias y lo más lisas posibles para que el agua no sea contaminada (con contaminantes como tierra, polvo, excremento, ramas, hojas) y sea segura de consumir. Mientras que, para usos no potables, el requisito de utilizar superficies limpias no es un limitante. Las superficies, en ambos casos, no deben ser utilizadas para una actividad distinta a la recolección de agua, por ejemplo, como hábitat de mascotas o

espacio de almacenamiento [11]. Los sistemas de captación de agua de lluvia tienen una serie de elementos principales que son indispensables para su funcionamiento y son comunes en todos los sistemas diseñados independientemente de su aplicación. Estos elementos son los siguientes: superficie de captación, centralización y distribución, almacenamiento pluvial, filtración, manejo y mantenimiento. A continuación, se presenta una descripción de cada uno de estos elementos.

- **Superficie de captación:** Es la superficie sobre la que la lluvia cae y se desplaza por gravedad hacia la dirección que se desea. Su tamaño, junto a la cantidad de lluvia que cae, determina el volumen que se puede recolectar. Generalmente se trata de un techo en caso de implementar el sistema en una vivienda o edificio, o de una cubierta en caso de ubicarse en un terreno [11].

- **Centralización y distribución:** Para llevar el agua de la superficie de captación hacia el almacenamiento pluvial, se necesitan elementos como canaletas, tuberías y otros elementos de conducción. El objetivo es conducir el agua por gravedad a un conducto principal que llegue al almacenamiento [11].

- **Almacenamiento pluvial:** El almacenamiento puede realizarse en un tanque, cisterna, reservorio o cualquier clase de contenedor que pueda retener el agua de forma segura y sin filtraciones. Su tamaño debe ser seleccionado con base a la superficie de captación y cantidad de lluvia, sin embargo, su tamaño es determinado en gran parte por el espacio físico disponible ya que debe permanecer dentro del sistema [11].

- **Filtración:** Un sistema de captación requiere de alguna clase de filtro previo al almacenamiento con el fin de evitar el ingreso de contaminantes grandes como hojas, ramas u otros elementos que puedan bloquear los conductos. Los filtros deben ser de fácil acceso y limpieza [11].

- **Manejo y mantenimiento:** El diseño del sistema debe evitar ser de fácil manejo y mantenimiento para lograr un uso eficiente. Para esto, los equipos y superficies deben mantenerse limpios y funcionales, por lo que el diseño debe facilitar su limpieza y reemplazo en caso de ser necesario [11].

Necesidad hídrica de los cultivos

La necesidad de agua de los cultivos se expresa en términos de su evapotranspiración, el cual es un efecto que combina la evaporación debido a las condiciones climáticas del cultivo con su transpiración. La evapotranspiración depende de las condiciones climáticas del lugar en el que se ubica el cultivo y de su especie, es decir, si se trata de un cultivo de hortalizas, frutas, etc. Este concepto involucra dos conceptos fundamentales: evapotranspiración de referencia (ETo) y evapotranspiración del cultivo (ETc). La evapotranspiración de referencia es un valor que se relaciona con el clima y describe la capacidad de la atmósfera para evaporar el agua de una superficie de referencia. Esta superficie de referencia se define como un cultivo de pasto a condiciones estándar. Los factores climáticos son los únicos que influyen en el valor de la evapotranspiración de referencia, por lo que se considera a la misma como otro parámetro climático y corresponde a un lugar y época del año específicos. Los valores de este parámetro pueden ser estimados utilizando modelos matemáticos, como el método FAO Penman-Monteith. NO obstante, existen estudios y bases de datos de donde se pueden consultar los valores de este parámetro [12].

La evapotranspiración del cultivo se entiende como la cantidad de agua que debe ser proporcionada por un sistema de riego para compensar la pérdida de agua por el proceso de evapotranspiración. Este parámetro se relaciona con la evapotranspiración de referencia mediante el coeficiente de cultivo (Kc), definido como la relación ETc/Eto y puede determinarse experimentalmente para diferentes cultivos. La diferencia entre la evapotranspiración de referencia y de cultivo se da por características de las plantas como la forma de las hojas, estomas y formas aerodinámicas que cambian el valor de la evapotranspiración a pesar de encontrarse en las mismas condiciones climáticas. Estas características también cambian de acuerdo al periodo de desarrollo del cultivo, por lo que el valor de Kc también cambia desde el momento de la siembra hasta la cosecha [12].

Riego por goteo

Un sistema de riego por goteo es un conjunto de componentes que proporcionan agua a los cultivos en pequeñas cantidades en forma de gotas a través de goteros, también llamados emisores. Esta clase de sistemas son sistemas presurizados, es decir, que utilizan bombas de agua para movilizar el fluido a través de conductos con el fin de entregarlo a los lugares donde lo requieran. Esta clase de riego es localizado, ya que el agua no es dispersada sobre un área grande donde se ubican varias plantas, sino que se lo hace en un área pequeña donde, usualmente, se ubica una sola planta. A pesar de que este sistema proporciona agua en pequeños volúmenes, esta cantidad es suficiente para

garantizar un buen desarrollo de la plantación [13]. Un sistema de riego por goteo cuenta con los siguientes elementos principales:

- **Fuente de abastecimiento:** Se trata de la reserva de donde se obtiene el agua que se entregará a los cultivos. Puede ser una conexión a la red pública de agua, un tanque de almacenamiento o un reservorio de grandes dimensiones. El tipo y tamaño de la fuente de abastecimiento depende de la aplicación; por ejemplo, si se desea regar grandes extensiones de terreno se utiliza un reservorio, ya que se maneja un gran volumen de agua. Los reservorios suelen ser cubiertos por una geomembrana en el fondo para evitar pérdidas por filtración hacia el suelo [13].
- **Cabezal principal:** Hace referencia al conjunto de elementos que controlan la instalación. Proporciona caudal y presión a toda la instalación y en él se ubican elementos complementarios como filtros, inyectoros de fertilizantes, manómetros y válvulas que ayudan al manejo de la instalación. El cabezal principal consiste en la operación conjunta de varios equipos como: bombas, filtros, unidad de fertilización, aparatos de control y medición [13].
- **Tuberías principales:** Son los conductos que se conectan al cabezal principal y transportan la totalidad del caudal que circula por el sistema de riego. Las más empleadas son las tuberías de cloruro de polivinilo (PVC) y tuberías de polietileno de alta densidad. Su selección se realiza con base a su diámetro y su presión de trabajo [13].
- **Cabezales de campo:** Hace referencia a las válvulas instaladas en las divisiones de la tubería principal con el fin de permitir o interrumpir el flujo de agua hacia los campos de riego. Las válvulas utilizadas pueden ser de operación sencilla como una válvula de bola, o compleja como válvulas hidráulicas. Su selección depende de los criterios de diseño establecidos para el sistema [13].
- **Laterales de riego:** Son tuberías hechas de polietileno de baja densidad con un diámetro más pequeño que el resto de tuberías de la instalación, normalmente en el rango de 14mm a 20mm. Son las encargadas de proporcionar el caudal a las plantas a través de los goteros en su interior, por lo que se ubican dentro de la plantación, sobre cada una de las líneas de cultivo [13].
- **Emisores:** Estos dispositivos se encargan de controlar la salida del agua y cumple con los siguientes requerimientos: proporciona un caudal constante frente a cambios de presión, resistentes a la obstrucción, resistentes al ambiente, poca pérdida de carga, entre otros. Existen dos tipos de emisores: goteros y cintas.
 - **Goteros:** Hay una gran variedad de goteros en el mercado con diferentes formas y configuraciones. Los más utilizados son:

- **Goteros de laberinto:** Obligan al caudal a pasar por una trayectoria compleja y a perder presión; trabajan en régimen turbulento y son resistentes a las obstrucciones [13].
- **Goteros tipo Vórtex:** El agua pasa por un orificio hacia una pequeña cámara tangencialmente, lo que provoca un movimiento en espiral para salir finalmente al exterior en forma de gota [13].
- **Cintas:** Son largas cintas con emisores incorporados de fábrica con una gran selección de caudales y espacios entre emisores. Se pueden encontrar en el mercado con espaciamiento entre emisores desde 0,2 m a 0,6 m y operan con presiones alrededor de 1 bar. De acuerdo a su mecanismo de regulación se pueden clasificar en:
 - **Auto - compensados:** Entregan el mismo caudal a pesar de sufrir variaciones en la presión de funcionamiento. Trabajan con flujo turbulento y cuentan con un diafragma que se deforma de acuerdo a la diferencia de presión, lo que modifica el conducto y mantiene el caudal constante [13].
 - **No compensados:** No posee mecanismos de regulación de caudal, por lo que el mismo varía de acuerdo a la presión de operación de la cinta. Son más económicos y trabajan a menor presión que los auto – compensados [13].

El uso de un sistema de riego por goteo trae consigo una serie de ventajas como la reducción de la evaporación del suelo, automatización del proceso de riego, buena capacidad de adaptarse a terrenos irregulares y con pendientes pronunciadas, entre otras [14].

Bombas de agua en sistemas de riego por goteo

Una bomba de agua es un dispositivo cuya función es la de suministrar un caudal y presión adecuada para la aplicación en la que se encuentre operando. En los sistemas de riego por goteo una bomba es necesaria para circular el agua desde la fuente a través de las tuberías de conducción y emisores. Su selección es un proceso de gran importancia y que requiere un alto entendimiento de las condiciones de operación y requerimientos del sistema. En una gran cantidad de aplicaciones de riego, se utilizan bombas centrífugas que consisten en una bomba rotatoria que proporciona energía al caudal mediante la aplicación de una fuerza centrífuga utilizando un impulsor rotatorio. Para seleccionar una bomba se requiere analizar cuatro factores esenciales [15]:

- **Caudal:** El caudal especifica el volumen de agua que debe suministrar la bomba por unidad de tiempo y viene dado por la necesidad del cultivo.
- **Presión:** Es la condición final a la que se lleva el fluido. También se hace referencia a este parámetro como altura, ya que la bomba es capaz de elevar el fluido desde un nivel de referencia hasta una altura (en metros) dada por la necesidad del sistema en el que opera.
- **Presión Neta Positiva de Succión (NPSH):** Es la altura de succión requerida en el ingreso de una bomba que le permite operar evitando el efecto de cavitación. Esta altura depende de la presión de vapor del fluido y la presión atmosférica del lugar en el que se ubica la bomba. En el caso de Quito, una bomba puede operar con una NPSH de máximo 7 m.
- **Pérdidas de presión:** Existen pérdidas de presión provocadas por el rozamiento entre el fluido y las paredes de la tubería en la que se moviliza. Esta clase de pérdidas se denominan pérdidas mayores, y dependen de la longitud de la tubería de conducción y la velocidad a la que circula el fluido. Otro tipo de pérdidas son las llamadas pérdidas menores, que son pérdidas de presión producidas en accesorios como válvulas, codos, uniones y tees. Esta clase de pérdidas dependen del accesorio y la velocidad a la que el fluido circula por el accesorio.

Cada bomba debe ser proporcionada con su respectiva curva de rendimiento. Esta relaciona el caudal con la presión (altura) de salida y es un elemento indispensable en la selección de la misma dentro del proceso de construcción del sistema de riego. Algunas curvas también proporcionan información de gran importancia como curvas de rendimiento para diferentes diámetros de impulsores, curvas de eficiencia, potencia del motor eléctrico y curva de NPSH.

2 METODOLOGÍA

2.1 Descripción del sistema

El caso de estudio es un sistema que toma como entradas la energía solar y el agua lluvia disponible en la ciudad de Quito y entrega riego en un cultivo dentro de un terreno con una superficie de 1 hectárea (10 000 m²). El sistema descrito anteriormente es un sistema agrivoltaico, es decir, utiliza energía eléctrica generada por paneles fotovoltaicos para obtener su salida (riego de cultivo) como se muestra en la figura 1.

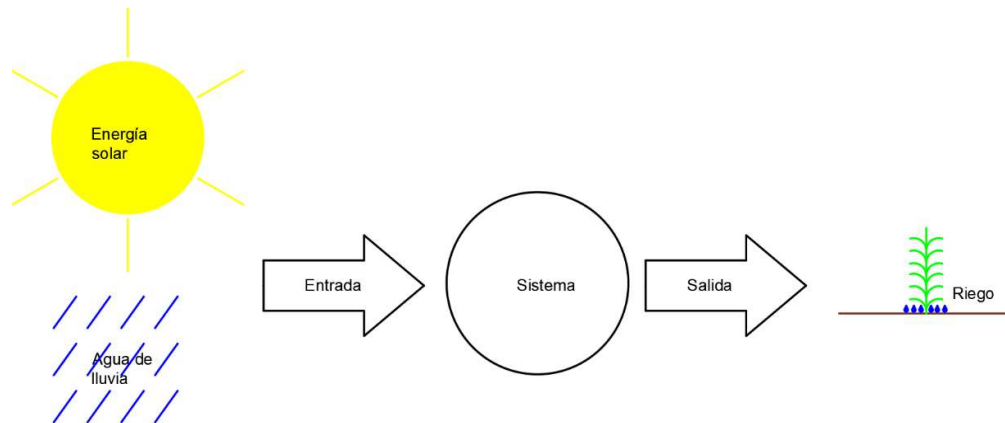


Figura 1. Esquema general del sistema

A su vez, el sistema consta de otros dos sistemas más pequeños: un sistema encargado de la captación del agua de lluvia y otro encargado de distribuirla al cultivo, denominados subsistema de captación y subsistema de distribución, respectivamente. Cada uno de estos subsistemas tiene su propia entrada y elementos constitutivos. Esta descripción más detallada del sistema muestra cómo ambos sistemas -a pesar de utilizar recursos diferentes- trabajan juntos para lograr un objetivo común, como se ilustra en la figura 2.

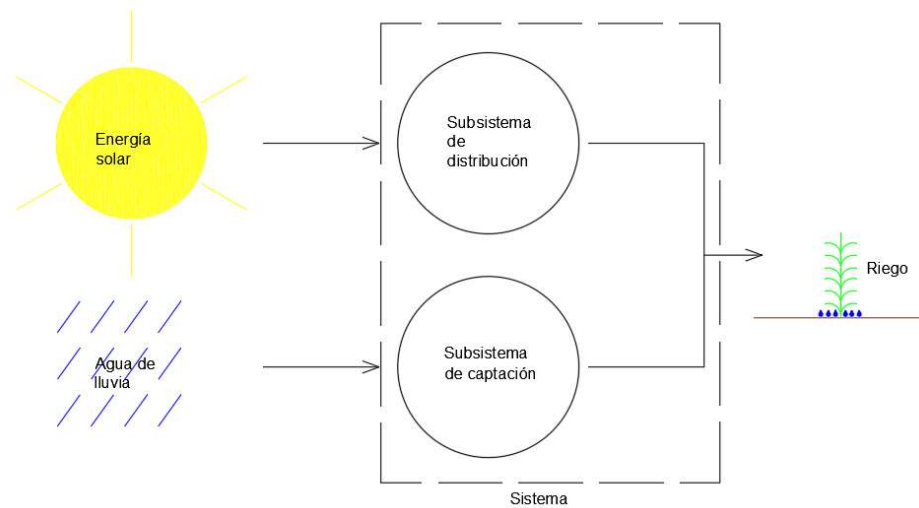


Figura 2. Esquema del sistema en base a sus subsistemas

En el subsistema de captación, la presencia de los paneles fotovoltaicos crea la posibilidad de utilizarlos como superficie de captación para el agua proveniente de las precipitaciones, debido a que son superficies inclinadas y el agua puede desplazarse por gravedad. El agua recolectada es conducida por tuberías hacia un reservorio en el cual se almacena para su posterior uso. Este reservorio es capaz de almacenar el volumen total de agua recolectada por las superficies de captación. Una vez el sistema ha realizado la captación del agua de lluvia, pasa a la etapa de distribución, donde se utiliza una bomba de agua que sea capaz de conducir el agua desde el reservorio a los cultivos a través de una red de tuberías hasta llegar a los emisores, que se encargan de entregar el agua al suelo.

2.2 Estimaciones

Radiación solar y agua lluvia disponible

Debido a que el sistema utilizará energía solar y agua de lluvia, es conveniente determinar qué cantidad de cada recurso puede obtenerse de la ubicación geográfica en la que se encuentra. En este caso, el sistema estaría localizado en la ciudad de Quito por lo que se realizarán las estimaciones utilizando datos meteorológicos disponibles para la ciudad.

Para la radiación solar, se realizará una estimación mensual en base a datos obtenidos del año típico meteorológico 2021 que, a su vez, fue obtenido de la NSRDB [16]. La base de datos cuenta con algunas variables que describen la climatología de la ciudad de Quito como: Irradiancia horizontal difusa (DHI), Irradiancia normal directa (DNI), Irradiancia global horizontal (GHI), Albedo, Presión, Dirección y velocidad del viento, temperatura y punto de

rocío. De todas estas variables se tomarán solamente los datos de la variable GHI, puesto que es la que influye directamente en la cantidad de energía que se puede generar utilizando paneles fotovoltaicos. Para esto, se filtrarán los datos utilizando el programa Microsoft Excel y se creará una nueva base de datos que solamente contenga los datos de GHI. Luego, se ingresará la base de datos al software MATLAB donde se realizarán los cálculos correspondientes debido a que se requieren valores diarios de un año completo, y los datos obtenidos son horarios. Es decir que se van a procesar 24 datos por día (un dato por cada hora) por 365 días del año, dando un total de 8760 datos, que es un gran volumen de datos. En los cálculos se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$P_d = \sum_{i=1}^{24} GHI_i \left[\frac{Wh}{m^2 \text{ día}} \right]$$

Ecuación 1. Irradiancia total en un día

$$P_m = \sum_{j=1}^k P_{dj} \left[\frac{Wh}{m^2 \text{ mes}} \right]$$

Ecuación 2. Irradiancia total en un mes

Donde:

GHI_i : Irradiancia en la hora i en $[W/m^2]$

i : hora del día

j : día del mes

k : número de días del mes (30, 31 o 28 según corresponda)

Para la precipitación, se realizará una estimación semanal con base a los datos obtenidos de la Secretaría del Ambiente para el año 2022 [4], los cuales son dados en mm (milímetros). La base de datos tiene registros horarios, es decir, la cantidad de mm de lluvia por cada hora en un periodo de un día (24 horas) por lo que se manejará un volumen de datos igual al de la radiación solar (8760 datos). Así, se utilizará un procedimiento similar al descrito anteriormente para la radiación solar con las siguientes ecuaciones:

$$Pr_d = \sum_{i=1}^{24} Pr_i \text{ [mm]}$$

Ecuación 3. Precipitación total en un día

$$Pr_s = \sum_{j=1}^7 Pr_{dj} \text{ [mm]}$$

Ecuación 4. Precipitación total en una semana

Donde:

Pr_i : Precipitación en la hora i en [mm]

i : hora del día

j : día de la semana

Sistema de captación de agua de lluvia

Una vez estimados los recursos disponibles se continuará con el diseño del sistema de captación de agua lluvia. En esta etapa se analizará qué elementos formarán parte de este sistema entre los cuales se encuentra: superficie de captación, canales de distribución y centralización y reservorio de almacenamiento pluvial. Se explorarán las alternativas existentes para la selección de la superficie de captación y las características que debe cumplir referentes a material utilizado, inclinación y disposición. Para los canales de distribución y centralización se analizarán y escogerán sus elementos constitutivos, entre los que se encuentran los canales de agua que recogerán el agua captada por la superficie, tuberías y acequias que conducirán a la misma hacia el reservorio, así como las especificaciones de sus dimensiones, inclinación y conexiones. En la selección de los elementos de los canales de distribución y centralización se realizará una búsqueda de los mismos en el mercado puesto que, en su mayoría, consisten en elementos fabricados por empresas manufactureras que son comercializados por las mismas, como es el caso de los canales de agua y tuberías. Elementos como acequias serán construidos tomando en cuenta el espacio físico, es decir, distancia entre cultivos, distancia entre paneles fotovoltaicos, largo y ancho del terreno, etc. La superficie de captación será ideada de acuerdo al área definida en la descripción del sistema (10 000 m²) pues el espacio físico es un limitante debido a que todos los elementos del sistema se encontrarán juntos en el mismo lugar.

Cantidad de energía fotovoltaica generada

De la sección de diseño del sistema de captación de agua de lluvia, se obtiene un módulo de captación que es una unidad que se repite en toda el área del caso de estudio para formar la totalidad del sistema de captación. Con esta premisa, se estima la cantidad de paneles fotovoltaicos con la siguiente ecuación:

$$N_{PV} = PV_M * M_F * F * B$$

Ecuación 5. Número total de paneles fotovoltaicos

Donde:

PV_M : Número de paneles fotovoltaicos por módulo

M_F : Número de módulos por fila

F : Número de filas

B : Número de bloques

Una vez estimada la cantidad de paneles fotovoltaicos, se determina las horas pico disponibles para cada mes utilizando las siguientes ecuaciones:

$$P_{m1i} = P_{mi} * \frac{1}{30} * \frac{1}{12} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Ecuación 6. Irradiancia total en el mes i en W/m²

$$h_{pi} = P_{m1i} * 12 * 30 * \frac{1}{1000} [h]$$

Ecuación 7. Horas pico disponibles en el mes i

Donde:

P_{mi} : Irradiancia total en el mes i

Finalmente, se calcula la cantidad de energía eléctrica producida mediante la siguiente ecuación:

$$PV_i = N_{PV} * W_p * h_{pi} [Wh]$$

Ecuación 8. Energía eléctrica generada en el mes i

Donde:

N_{pv} : Número de paneles fotovoltaicos

W_p : Potencia pico del panel [W]

h_{pi} : Horas pico disponibles en el mes i [h]

Cantidad de agua lluvia capturada

Con base al área horizontal total de la superficie de captación se puede determinar la cantidad de agua de lluvia que se captará tomando en cuenta que 1 mm de lluvia corresponde a 1 l/m² y utilizando las siguientes ecuaciones:

$$A = N_{pv} * A_{pv} \cos(\theta) \quad [m^2]$$

Ecuación 9. Área horizontal de la superficie de captación

$$Pr_c = \frac{1}{1000} * Pr_s * A \left[\frac{m^3}{semana} \right]$$

Ecuación 10. Precipitación capturada

Donde:

Pr_s : Precipitación total en una semana [mm]

θ : Ángulo de inclinación de la superficie de captación [°]

A_{pv} : Área del panel fotovoltaico [m²]

Nótese que Pr_s es una estimación semanal, por lo que Pr_c también es una estimación semanal. Dicho de otra manera, Pr_c es el volumen de agua capturado por semana y su valor no es constante, sino que es dependiente del tiempo ya que su expresión utiliza la variable Pr_s que también es dependiente del tiempo, como se verá más adelante en la sección de resultados.

Necesidad hídrica del cultivo

La necesidad hídrica se determina en términos de la evapotranspiración del cultivo que, a su vez, se determina utilizando la evapotranspiración de referencia utilizando la siguiente expresión:

$$ET_c = K_c * ET_o \left[\frac{mm}{mes} \right]$$

Ecuación 11. Evapotranspiración del cultivo [17]

Donde:

K_c : Factor de ajuste del cultivo

ET_o : Evapotranspiración de referencia [mm/mes]

Como el factor K_c depende de la especie del cultivo y la etapa de desarrollo, se debe establecer el caso del que se está determinando la necesidad hídrica utilizando los datos referenciales proporcionados en el ANEXO 2 y el valor de la evapotranspiración de referencia se obtiene de los valores referenciales en el ANEXO 3 para cada mes. Como se mencionó, el valor ET_o es dependiente del tiempo, por lo que el valor de ET_c también lo es. Es decir, es variable. Así, la necesidad hídrica del cultivo (en términos de la evapotranspiración del cultivo) se establece como el valor máximo de ET_c calculado con la ecuación 11.

Para cálculos posteriores, resulta indispensable determinar la necesidad del cultivo en unidades de caudal (volumen por unidad de tiempo). Para esto, se deben realizar cálculos que relacionen la evapotranspiración del cultivo, la geometría del cultivo, el número de emisores y el caudal de los emisores. Los cálculos mencionados anteriormente se realizan con las siguientes expresiones:

$$N_e = \frac{A}{D_h * D_s}$$

Ecuación 12. Número de emisores [17]

$$PP = \frac{N_e * Q_g}{A} \left[\frac{mm}{h} \right]$$

Ecuación 13. Precipitación del sistema [17]

$$TR = \frac{12}{52} * \frac{ET_c máx}{PP * \eta} \left[\frac{h}{semana} \right]$$

Ecuación 14. Tiempo de riego [17]

$$Q_T = N_e * Q_g \left[\frac{l}{h} \right]$$

Ecuación 15. Caudal total del sistema

$$Q_{TS} = \frac{Q_T * TR}{1000} \left[\frac{m^3}{semana} \right]$$

Ecuación 16. Caudal total del sistema en una semana

Donde:

A: Área horizontal de la superficie de captación [m²]

D_h: Separación entre emisores sobre la línea porta - emisores [m]

D_s: Distancia entre líneas de emisores [m]

Q_g: Caudal entregado por el emisor [l/h]

η: Eficiencia del sistema de goteo (0,9)

ET_{c máx}: Evapotranspiración del cultivo máxima [mm/mes]

Así, se establece la necesidad hídrica del cultivo como el valor *Q_{TS}*, que indica el volumen de agua que debe proporcionarse al cultivo semanalmente.

Volumen de agua en el reservorio

Para estimar la cantidad de agua en el reservorio se deben considerar las siguientes hipótesis:

- El cultivo no recibe agua en ningún momento por estar cubierto; por lo tanto, el riego se realiza durante todo el año.
- Si el volumen que se debe entregar al cultivo es mayor al volumen en el reservorio, no se lleva a cabo la actividad de riego.

Con base en estas hipótesis, se utilizan las siguientes dos ecuaciones para determinar el volumen de agua en el reservorio en un periodo determinado de tiempo:

$$V_{reservorio\ i} = P_{rc\ i} + V_{reservorio\ i-1} - Q_{TS} \ [m^3]$$

Ecuación 17. Volumen de agua en el reservorio en la semana *i*

$$V_{reservorio\ i} = P_{rc\ i} + V_{reservorio\ i-1} \ [m^3]$$

Ecuación 18. Volumen de agua en el reservorio en la semana *i* cuando no se realiza la actividad de riego

Donde:

$P_{rc\ i}$: Precipitación capturada en la semana i [m³]

$V_{reservorio\ i-1}$: Volumen de agua en el reservorio en la semana i-1 [m³]

Q_{TS} : Necesidad hídrica del sistema [m³]

Nótese que el volumen de agua en el reservorio varía en el tiempo, por lo que variará su valor de acuerdo al momento del año en el que se encuentre, como se verá posteriormente en la sección de resultados.

Dimensionamiento del reservorio

El dimensionamiento del reservorio se realiza considerando que debe ser capaz de almacenar la cantidad máxima de agua lluvia capturada por el sistema, y la cual se calcula como se detalla en el apartado anterior. La metodología a seguir será asumir dos medidas lineales del reservorio y calcular la dimensión restante utilizando la fórmula del volumen de un paralelepípedo, como se ilustra en la siguiente ecuación:

$$L = \frac{V_{reservorio\ máx}}{A_r * P} \quad [m]$$

Ecuación 19. Largo del reservorio

Donde:

$V_{reservorio\ máx}$: Volumen de agua máximo captado en el reservorio [m³]

A_r : Ancho del reservorio, se asume un valor de 12 [m]

P : Profundidad del reservorio, se asume un valor de 3,7 [m]

Dimensionamiento y selección de la bomba

Para esta sección, se requiere determinar las necesidades de presión que la bomba debe proporcionar para que el sistema funcione con los parámetros establecidos de altura de elevación del fluido, caudal y distancia a la que debe llegar el mismo para regar los cultivos. En otras palabras, se debe calcular la altura total que debe proporcionar la bomba con base en la necesidad hídrica del cultivo, altura de elevación y pérdidas totales del sistema. En este proceso se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$R = R_F * F * B$$

Ecuación 20. Número de tuberías de riego

$$Q_{regante} = \frac{Q_T}{R} * \frac{1}{1000} * \frac{1}{3600} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Ecuación 21. Caudal en las tuberías de riego

Donde:

R_f : Número de tuberías de riego por fila de módulos de captación

F : Número de filas

B : Número de bloques

Q_T : Caudal total del sistema [l/h]

Una vez determinado el caudal en la tubería de riego, se calcula la velocidad del fluido con la siguiente expresión:

$$v_{regante} = \frac{4 * Q_{regante}}{\pi * D_{regante}^2} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Ecuación 22. Velocidad del fluido dentro de la tubería de riego

Donde:

$Q_{regante}$: Caudal en la tubería de riego [m³/s]

$D_{regante}$: Diámetro del canal de riego [m]

Un procedimiento similar se realiza para encontrar la velocidad utilizando la ecuación 22 en las tuberías secundarias y principal; lo que cambia es el caudal, que para la tubería principal se utiliza el parámetro Q_T expresado en unidades de [m³/s] y el caudal en la tubería secundaria se determina utilizando la expresión:

$$Q_{secundario} = \frac{Q_T}{2} * \frac{1}{1000} * \frac{1}{3600} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Ecuación 23. Caudal en la tubería secundaria

Donde:

Q_T : Caudal en la tubería principal [l/h]

La velocidad del fluido es un parámetro fundamental para determinar las pérdidas mayores y menores del sistema, lo cual se realiza utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Ecuación 24. Número de Reynolds

$$f = \frac{0,25}{\left(\log_{10}\left(\frac{\varepsilon}{3,7 * D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right)\right)^2}$$

Ecuación 25. Ecuación de Colebrook para el factor de fricción

$$h_{LM} = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} [m]$$

Ecuación 26. Ecuación de Darcy para las pérdidas mayores (fricción)

$$h_{Lm} = \sum K * \frac{v^2}{2g} [m]$$

Ecuación 27. Pérdidas menores del sistema

Donde:

ρ : Densidad del agua asumida como 999,03 [kg/m³] [18]

v : Velocidad del fluido [m/s]

D : Diámetro de la tubería [m]

ε : Rugosidad absoluta de la tubería [m]

L : Longitud de la tubería [m]

g : Aceleración de la gravedad asumida como 9,81 [m/s²]

K : Constante del accesorio (codo, válvulas, etc.)

En el caso del filtro, se estima la pérdida de presión utilizando la gráfica en el ANEXO 4.

Las ecuaciones 24 a 27 deben ser utilizadas reemplazando los parámetros correspondientes al caso que se esté analizando. Se analizarán las pérdidas en cuatro secciones del sistema:

- Tubería principal
- Tubería secundaria
- Canal de riego
- Tubería de succión

Así, se estiman las pérdidas totales del sistema de riego diseñado de la siguiente manera:

$$h_L = h_{succión} + h_{principal} + h_{secundaria} + h_{regante} + h_{Lm} \text{ [m]}$$

Ecuación 28. Pérdidas totales del sistema de riego

Donde:

$h_{succión}$: Pérdidas por fricción en la succión [m]

$h_{principal}$: Pérdidas por fricción en la tubería principal [m]

$h_{secundaria}$: Pérdidas por fricción en la tubería secundaria [m]

$h_{regante}$: Pérdidas por fricción en el canal de riego [m]

h_{Lm} : Pérdidas menores [m]

Finalmente, la altura que la bomba debe ser capaz de entregar al sistema de riego viene dada por:

$$h_B = P + h_L \text{ [m]}$$

Ecuación 29. Altura total de la bomba

Donde:

P : Profundidad del reservorio [m]

h_L : Pérdidas totales del sistema de riego [m]

Una vez determinada la altura total de la bomba, se seleccionará una bomba que trabaje en un rango de altura acorde a la calculada. Esta selección se realiza en base a la curva de rendimiento de la bomba ingresando al gráfico con el caudal requerido. La información obtenida de esta gráfica es la altura que proporcionará finalmente la bomba seleccionada, el tamaño del impulsor y su eficiencia.

También, se debe realizar el cálculo de la NPSH disponible. Este cálculo se realiza para verificar que en la operación de la bomba seleccionada no ocurra el fenómeno de cavitación. Para el cálculo de la NSPH disponible se utilizará la siguiente ecuación:

$$NSPH_d = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho g} - P - h_{succión} \text{ [m]}$$

Ecuación 30. Altura neta positiva de succión

Donde:

P_{atm} : Presión atmosférica en la ciudad de Quito, se asume un valor de 72 [kPa]

P_v : Presión de vapor del agua en la ciudad de Quito, se asume un valor de 2339 [Pa] [19]

ρ : Densidad del agua asumida como 999,03 [kg/m³]

g : Aceleración de la gravedad asumida como 9,81 [m/s²]

P : Profundidad del reservorio [m]

$h_{succión}$: Pérdidas por fricción en la succión [m]

El valor de $NSPH_d$ es comparado al valor requerido por la bomba. Este último se obtiene del gráfico de rendimiento de la bomba seleccionada. Ambos valores deben cumplir con la siguiente relación:

$$NSPH_d > NSPH_r$$

Inecuación 1. Relación entre la altura neta positiva de succión disponible y requerido

Donde:

$NSPH_d$: Altura neta positiva de succión disponible [m]

$NSPH_r$: Altura neta positiva de succión requerida [m]

Evaluación energética del sistema

Para realizar la evaluación energética del sistema, se requiere calcular la energía consumida por el sistema. El dispositivo que consume la totalidad de la energía en el sistema diseñado es la bomba de agua, y esta energía puede ser cuantificada mediante la siguiente expresión:

$$P_B = \frac{\rho Q_T g h_B}{1000 * 3600} [W]$$

Ecuación 31. Potencia de la bomba

Donde:

ρ : Densidad del agua asumida como 999,03 [kg/m³]

Q_T : Caudal en la tubería principal [l/h]

g : Aceleración de la gravedad asumida como 9,81 [m/s²]

h_B : Altura total de la bomba [m]

La potencia calculada con la ecuación 31 es la potencia entregada al fluido a través del impulsor. Esta energía es el resultado de un proceso de transmisión de energía mecánica del motor eléctrico hacia el impulsor junto a la turbulencia generada en el fluido entre el impulsor y la carcasa de la bomba. La potencia de la bomba y la potencia con la que se alimenta al motor eléctrico se relacionan entre sí a través de la eficiencia de la bomba mediante la siguiente expresión:

$$P_e = \frac{P_B}{\eta_B} [W]$$

Ecuación 32. Potencia de entrada de la bomba

Donde:

P_B : Potencia de la bomba [W]

η_B : Eficiencia de la bomba [W]

Una vez calculada la potencia de entrada se procede a estimar la cantidad de energía consumida mensualmente por la bomba. Esta cantidad viene dada por la ecuación 33 presentada a continuación:

$$E_c = P_e * TR * \frac{52}{12} \left[\frac{Wh}{mes} \right]$$

Ecuación 33. Energía consumida mensualmente por el motor eléctrico

Donde:

P_e : Potencia de entrada de la bomba [W]

TR : Tiempo de riego [h/semana]

Finalmente, se compara la energía consumida por el motor eléctrico de la bomba con la cantidad de energía eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos y se concluye si la energía generada es suficiente para alimentar la bomba de agua.

Los procedimientos anteriormente descritos para determinar la radiación solar y la precipitación disponible en la ciudad de Quito se encuentran desarrollados en el ANEXO 1 en un script de MATLAB.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Radiación solar y agua lluvia disponible

La cantidad de irradiancia horizontal global mensual GHI estimada se encuentra en la figura 2.

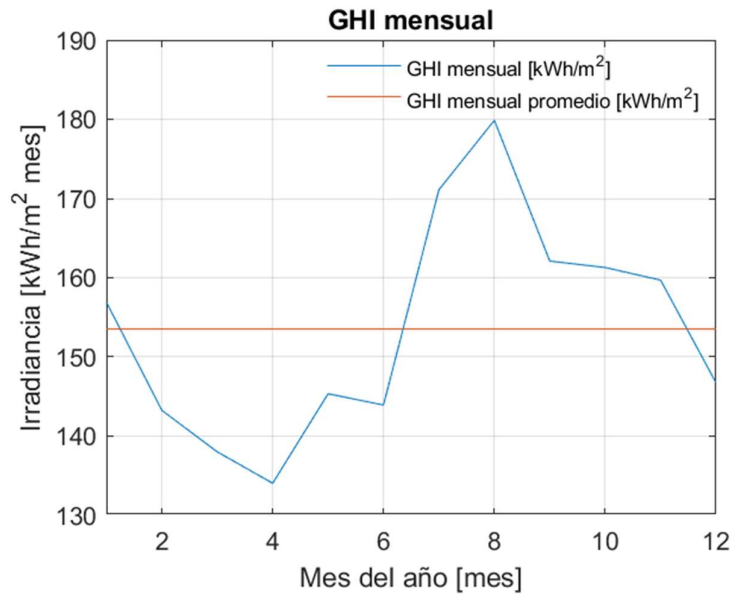


Figura 3. Estimación de GHI por mes

El gráfico muestra una cantidad de radiación solar más baja en los primeros 6 meses, especialmente en el mes de abril donde toma su menor valor de 134,054 [kWh/m²], mientras que en los siguientes 6 meses la radiación solar aumenta y toma su valor máximo en el mes de agosto cuando toma un valor de 179,869 [kWh/m²]. En promedio, en la ciudad de Quito se reciben 153,528 [kWh/m²]. Los valores de GHI son mensuales conforme a lo descrito en el apartado de metodología. La estimación de la precipitación se observa en la figura 3.

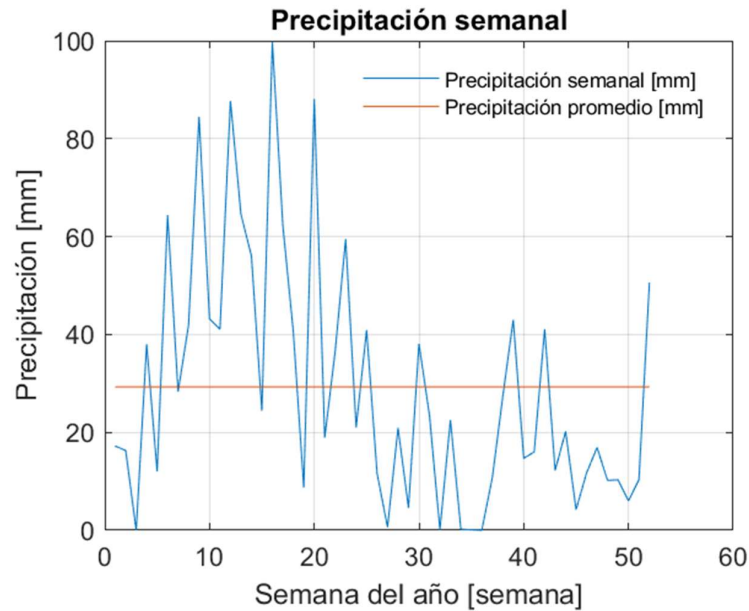


Figura 4. Estimación de precipitación por semana

El gráfico muestra que la primera mitad del año es el periodo con mayor presencia de precipitaciones con una cantidad máxima que se alcanza en la semana 16, correspondiente al mes de abril, arrojando un valor de 99,7 [mm]; mientras que la segunda mitad del año es el periodo con menor presencia de lluvia, llegando a un valor mínimo de 0 [mm] en la semana 36, correspondiente al mes de octubre.

Sistema de captación de agua lluvia

En la figura 5 se muestra el sistema de captación diseñado.



Figura 5. Módulo de captación

El sistema consiste en una estructura de acero sobre la cual se montan una serie de paneles solares que funcionan como superficie de captación tanto de energía solar como de agua de lluvia. Al final de la estructura está ubicado un canal de agua que es el responsable de recoger el agua que escurre de los paneles solares. Este canal se encuentra inclinado con el objetivo de que el agua pueda desplazarse por gravedad hacia su extremo. Para que el agua pueda desplazarse, el canal es instalado con una inclinación de $0,3^\circ$ [11]. Estos elementos configuran una unidad a la que se ha denominado “módulo de captación”; dicha unidad se repite a lo largo y ancho del terreno, como se muestra en la figura 6.



Figura 6. Disposición de los módulos de captación

Cada módulo tiene 10 paneles de área $1,64 \text{ [m}^2\text{]}$ [20] dando un área total de $16,4 \text{ [m}^2\text{]}$ por módulo. El área del módulo es distinta al área de captación, esto debido a que la cantidad de agua y radiación solar son expresadas en función de su incidencia sobre una superficie horizontal. Así, el área de captación es en realidad la proyección horizontal del área del módulo; la misma se encuentra inclinada 10° dando como resultado un área de captación igual a $16,15 \text{ [m}^2\text{]}$ por módulo. El sistema consiste en 2 bloques, cada bloque tiene 13 filas con 8 módulos por fila (figura 7) sumando un total de 208 módulos y 2080 paneles solares, dando como resultado una superficie de captación total de $3359,4 \text{ [m}^2\text{]}$.

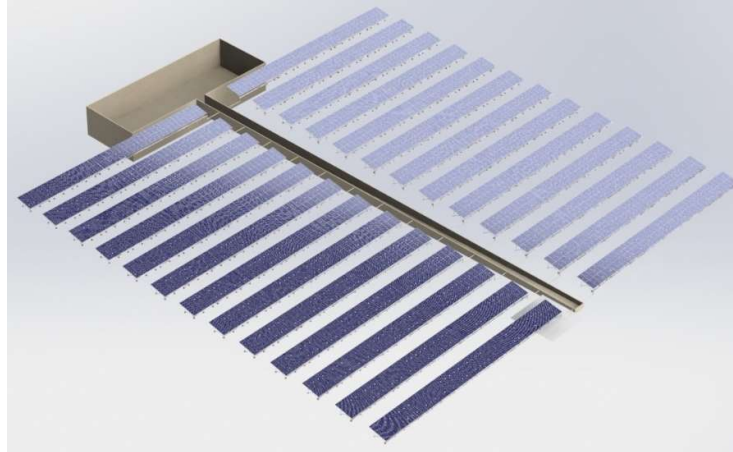


Figura 7. Bloques de captación

Como se muestra en la figura 7, en el extremo de cada fila se conecta una tubería de PVC que funciona como bajante para transportar el agua del canal hacia el suelo. El bajante es conectado a la acequia como se muestra en la figura 8 para un solo módulo y en la figura 9 para varias filas de módulos.

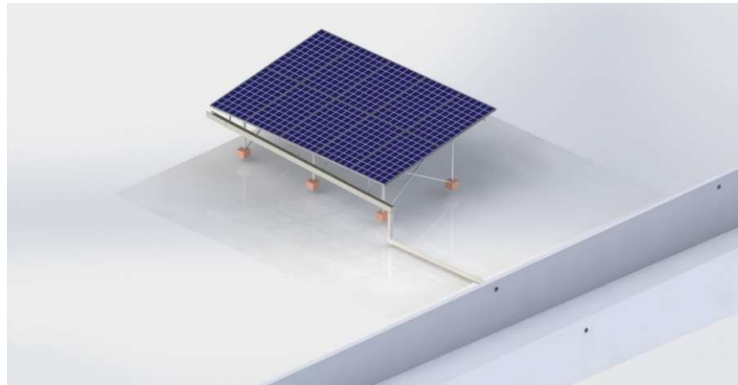


Figura 8. Conexión de un módulo con la acequia



Figura 9. Conexión de varias filas de módulos con la acequia

La acequia centraliza el flujo de agua de todas las filas y lo direcciona hacia el reservorio, donde desemboca y cae toda el agua recolectada. Esta acequia es construida con una inclinación de 1° para que el agua caiga por gravedad al reservorio, como se ilustra en la figura 10.



Figura 10. Vista lateral de la acequia y el reservorio

Energía fotovoltaica generada

La energía solar generada por los paneles fotovoltaicos se muestra en la figura 11.

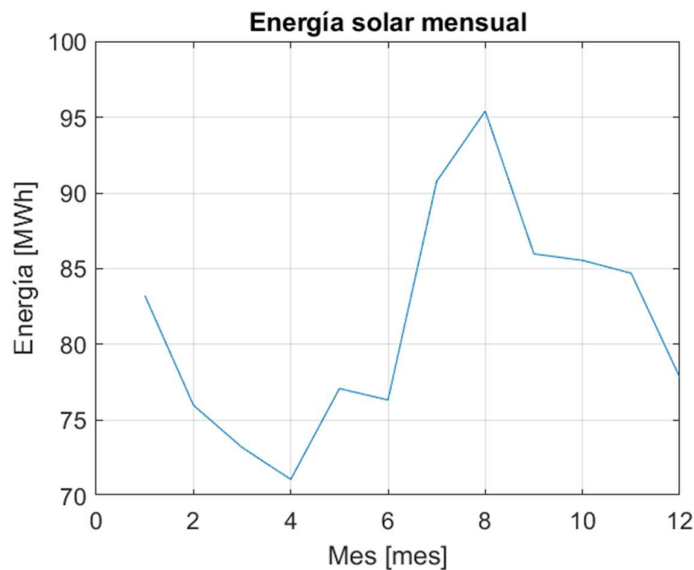


Figura 11. Estimación mensual de la energía generada por el sistema

La gráfica muestra un comportamiento igual al de la radiación solar disponible en la figura 3; esto se debe a que su cálculo se realiza multiplicando el área de captación que es constante por la radiación captada. Sin embargo, a pesar de tener un comportamiento igual, los valores son muy distintos. Los primeros meses del año se tiene la producción más baja de energía, alcanzando su valor mínimo en el mes de abril con 71,10 [MWh]. A partir del mes de junio, la producción aumenta alcanzando un valor máximo de 95,40 [MWh] en el mes de agosto. La estimación se ha realizado de forma mensual conforme a lo establecido en la metodología.

Agua lluvia captada

La precipitación capturada por el sistema se muestra en la figura 12.

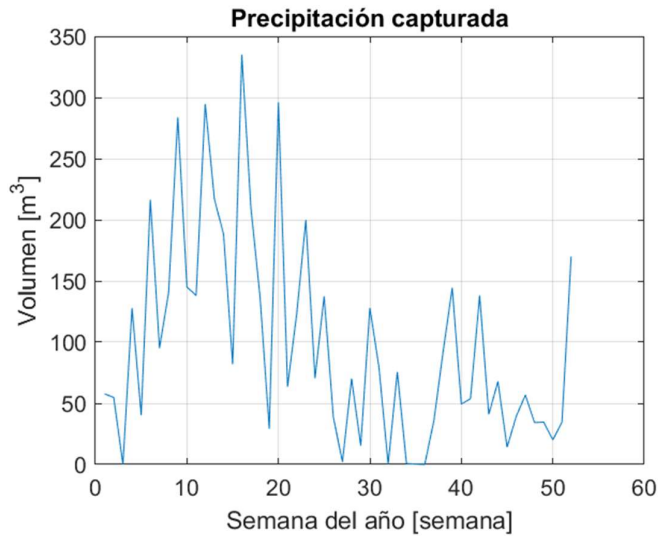


Figura 12. Precipitación semanal capturada por el sistema

La lluvia capturada presenta el mismo comportamiento que la precipitación disponible mostrada en la figura 4. La razón es que su estimación se realiza multiplicando los valores de precipitación disponible por el área de captación, que es un valor constante. El volumen de lluvia capturado es mayor en la primera mitad del año, alcanzando un máximo de 334,93 m^3 en la semana 16, correspondiente al mes de abril. El volumen de agua capturada disminuye en la segunda mitad del año, alcanzando un valor mínimo de 0 m^3 en la semana 36, correspondiente al mes de septiembre. La estimación se ha realizado de forma semanal conforme a lo establecido en la metodología y en concordancia a la estimación anterior de cantidad de lluvia disponible.

Necesidad hídrica del cultivo

La necesidad del cultivo se ha establecido en base a la evapotranspiración del cultivo conforme a lo descrito en la metodología. El caso seleccionado es el de un cultivo de papa en etapa final (ver ANEXO 3) por lo que se utilizó un coeficiente de cultivo $K_c = 0,9$. Así, se obtuvieron los siguientes valores para la evapotranspiración del cultivo:

TABLA 1. Estimación mensual de la evapotranspiración del cultivo

	ET_c $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}}\right]$
Enero	93,50
Febrero	83,09
Marzo	89,49
Abril	81,15
Mayo	84,47
Junio	85,82
Julio	106,40
Agosto	116,68
Septiembre	102,98
Octubre	98,15
Noviembre	85,76
Diciembre	91,11

La necesidad del cultivo se ha establecido como el valor máximo de evapotranspiración que experimenta el cultivo considerando que, si se cubre ese valor, se podrán cubrir los demás valores ya que son menores. En este caso, se encontró que el cultivo requiere de 116,68 [mm/mes].

La geometría del cultivo se muestra en la figura 13.

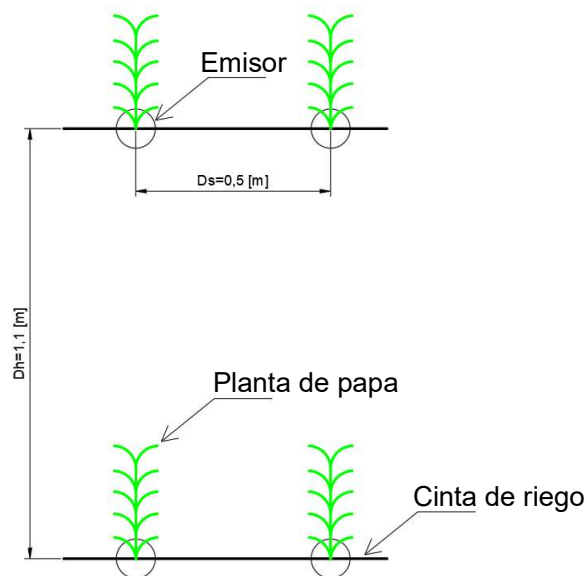


Figura 13. Geometría del cultivo [21]

En la figura se muestra que la disposición seleccionada es de una separación de 1,10 [m] entre líneas de riego y se utilizan cintas de riego con una separación de 0,5 [m] [22] entre emisores, los cuales se ubican uno por planta. Estas dimensiones, junto a otros parámetros, se utilizaron conforme a los descrito en la sección “Necesidad hídrica del cultivo” en la metodología, para determinar las cantidades presentadas en la tabla 2.

TABLA 2. Parámetros de diseño del sistema de riego

Número de emisores (N_e)	6108,00
Precipitación del sistema (PP) [$\frac{mm}{h}$]	4,18
Tiempo de riego (TR) [$\frac{h}{semana}$]	7,15
Caudal total del sistema (Q_T) [$\frac{l}{h}$]	14048,00
Caudal total del sistema semanal (Q_{TS}) [$\frac{m^3}{semana}$]	100,50

Volumen de agua y dimensionamiento del reservorio

En la figura 14 se presenta una gráfica que muestra el volumen de agua capturado por el sistema de captación de agua de lluvia y almacenado en el reservorio en base al algoritmo descrito en la sección “Volumen de agua en el reservorio” en la metodología.

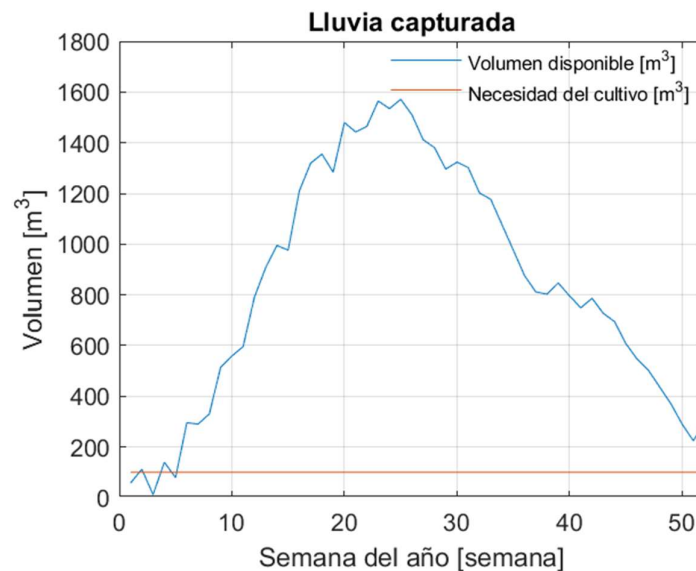


Figura 14. Volumen disponible y necesidad del cultivo en el primer año de funcionamiento

La gráfica muestra que, al inicio del año, hay tres semanas en las que el volumen de agua disponible en el reservorio se encuentra por debajo del requerimiento del cultivo, por lo que en estas tres semanas no se realizará la actividad de riego y la operación del sistema se limitará a la recolección del agua de lluvia. Así, se obtiene la gráfica presentada en la figura 15 para el volumen de agua en el reservorio para cada semana del año.

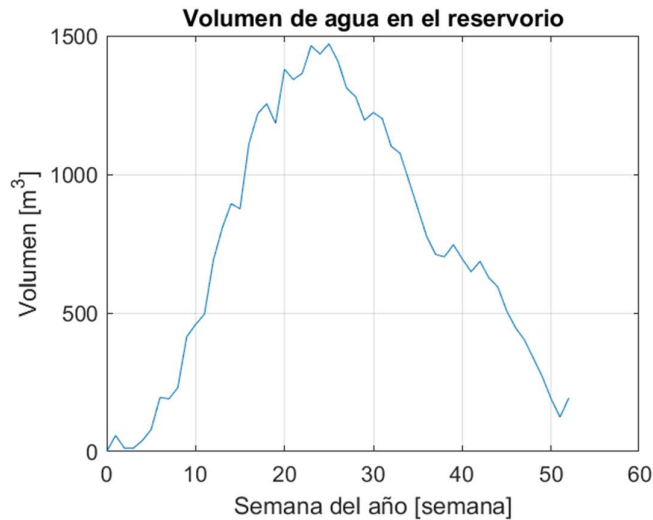


Figura 15. Volumen de agua en el reservorio en el primer año de funcionamiento

El volumen tiende a aumentar en la primera mitad del año hasta llegar a un valor máximo de 1470,83 [m³] en la semana 25, correspondiente al mes de julio. Desde ese punto, el volumen tiende a disminuir hasta el valor de 124,26 [m³] en la semana 51, correspondiente al mes de diciembre. Nótese que estos resultados corresponden al primer año de funcionamiento del sistema, por lo que el volumen inicial disponible en el reservorio es igual a 0 [m³]. Sin embargo, a partir del segundo año de funcionamiento, el volumen inicial del reservorio va a ser distinto de 0 [m³] e igual al volumen final del año anterior, obteniéndose resultados como los que se muestran en las figuras 16 y 17.

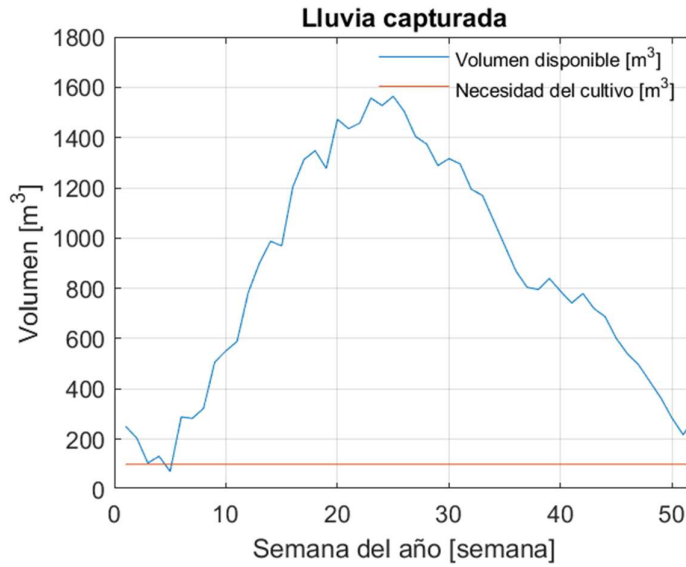


Figura 16. Volumen disponible y necesidad del cultivo en el segundo año de funcionamiento

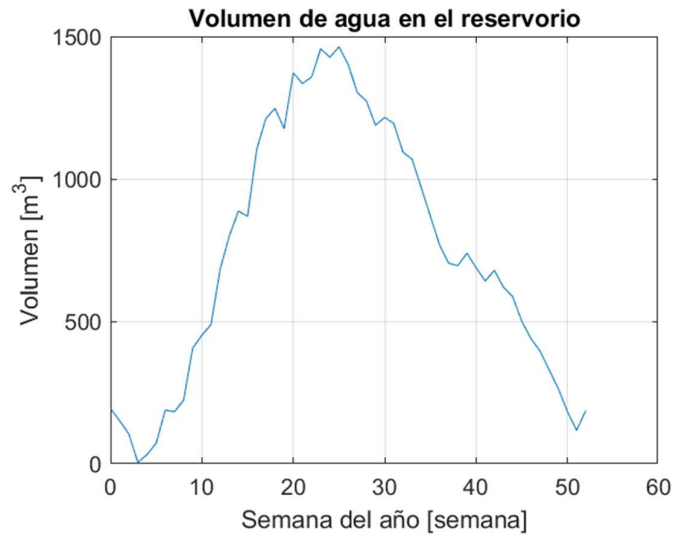


Figura 17. Volumen de agua en el reservorio en el segundo año de funcionamiento

El comportamiento de estas gráficas es el mismo que el de las figuras 14 y 15. También, presentan valores similares como el valor máximo del volumen de agua en el reservorio, que para este caso es de 1463,56 [m³]. La diferencia más importante entre este caso y el anterior es que, en la figura 16, se muestra que hay una semana en la que no se riega el cultivo por no tener suficiente volumen de agua disponible en el reservorio, que es 2 semanas menos que el caso anterior.

Las dimensiones del reservorio se han encontrado utilizando el valor de volumen máximo en el reservorio de 1470, 83 [m³] y la ecuación 19. Las dimensiones encontradas se encuentran en la tabla 3.

TABLA 3. Dimensiones del reservorio

Profundidad [m]	3,70
Ancho [m]	12,00
Largo [m]	33,13

Dimensionamiento y selección de la bomba

En la figura 19 se muestra las partes principales del sistema de distribución.

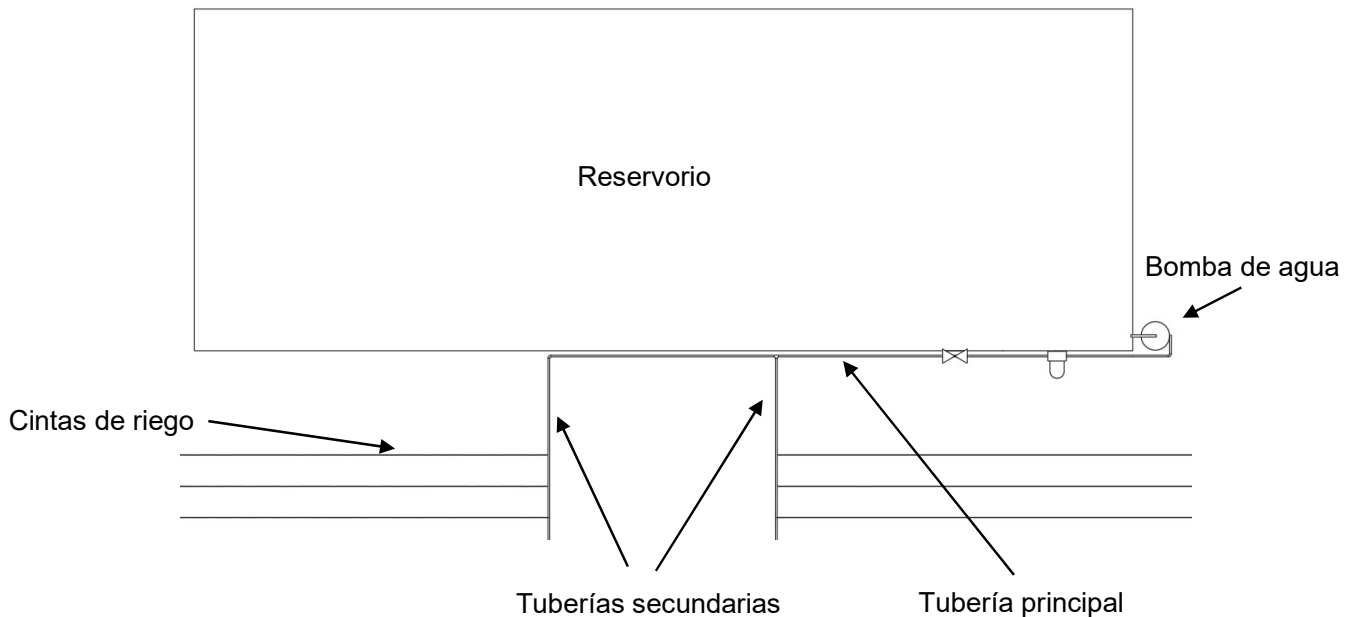


Figura 19. Elementos del sistema de distribución

Se observa cómo la distribución comienza en el reservorio de agua desde donde la bomba de agua impulsa el agua hacia la tubería principal. La tubería principal conduce el caudal total de agua y distribuye el mismo hacia las tuberías secundarias. Las tuberías secundarias trasladan el flujo de agua hacia cada uno de los bloques de riego (en este caso se tienen dos tuberías secundarias para dos bloques de riego). El caudal viaja por todo el largo de la tubería secundaria y llega hacia las cintas de riego. Las cintas de riego se ubican en grupos de 3 cintas sobre los cultivos y debajo de los paneles fotovoltaicos, dando un total de 78 cintas de riego.

En la figura 20 se muestra la ruta más crítica del sistema de conducción.

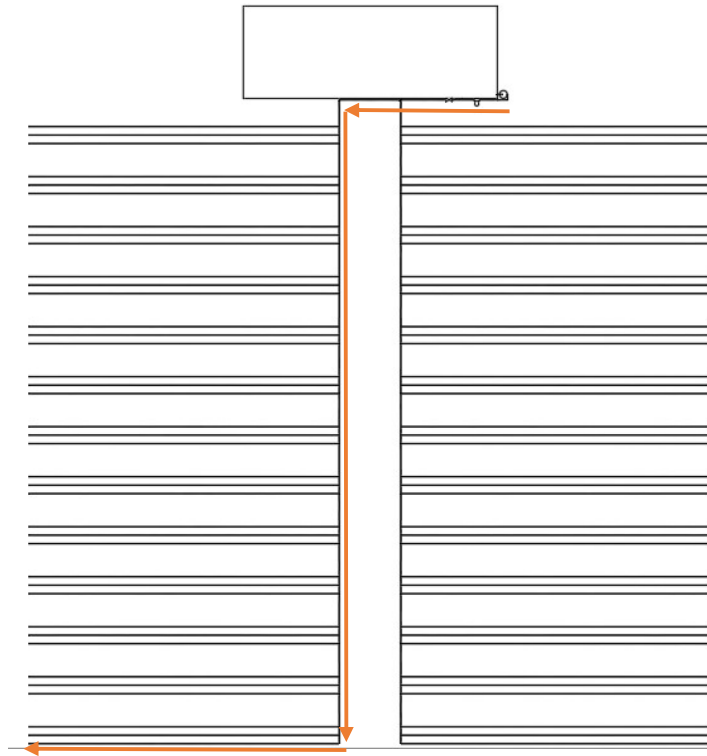


Figura 20. Ruta crítica de la red de tuberías

La ruta más crítica es la ruta que sigue el caudal que presenta la mayor cantidad de pérdidas por fricción y por accesorios. En la figura 20, la ruta crítica está resaltada con flechas anaranjadas. Las pérdidas por fricción se calcularon en base a la etapa del sistema de riego diseñado y son: succión, línea principal, línea secundaria y cinta de riego. Las longitudes y pérdidas de presión se muestran en la tabla 4.

TABLA 4. Pérdidas mayores del sistema

Etapa	Longitud [m]	Pérdidas [m]
Succión	3,7	0,04
Línea principal	12,5	0,47
Línea secundaria	91,6	1,80
Cinta de riego	40,32	0,58
Total		2,88

A continuación, en la figura 21 se muestran los accesorios utilizados en el sistema diseñado.

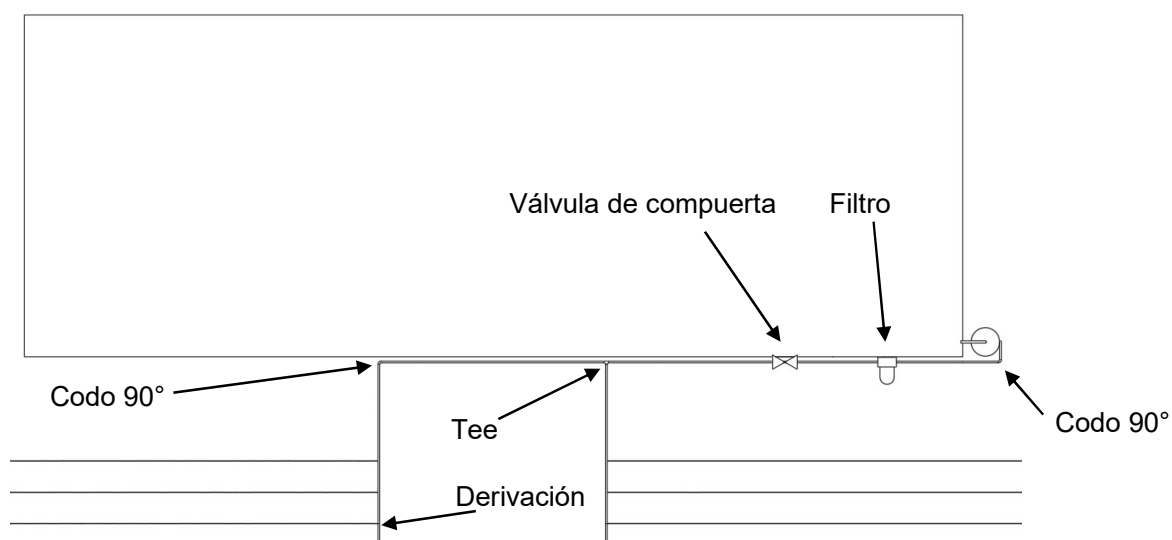


Figura 21. Accesorios del sistema de riego

En total se están utilizando los siguientes accesorios: 2 codos de 90°, 1 válvula de compuerta, 1 filtro de discos, 1 tee, y 42 derivaciones. Dentro de estos accesorios se pueden incluir los emisores dentro de las cintas de riego, sin embargo, en este caso se despreciarán ya que no provocan una pérdida de carga significativa [23].

TABLA 5. Pérdidas menores del sistema

Accesorio	Coefficiente de pérdidas K [24]	Pérdidas [m]
Codo 90° línea principal	0,9	0,0675
Codo 90° línea secundaria	0,9	0,0453
Filtro	-	0,5102
Valvula de compuerta	0,2	0,015
Derivaciones	2	3,9257
Tee	0,3	0,0151
	Total	4,5788

Se ha calculado una altura total de la bomba con los resultados mencionados anteriormente de pérdidas mayores, menores y altura de succión (asumida como la profundidad del reservorio) obteniéndose un valor de 11,15 [m]. También, se ha determinado un NPSH disponible de la bomba igual a 3,26 [m]. Finalmente, se ha seleccionado una bomba centrífuga marca Bell & Gossett Serie e-1510 modelo 1.25 AD que trabaja con potencias de 1 [hp] a 3 [hp] y opera a 1750 [rpm] [25]. La curva de rendimiento de la bomba seleccionada se encuentra en el ANEXO 5 y se han obtenido los siguientes datos de la misma:

TABLA 6. Parámetros de operación de la bomba seleccionada

Diámetro del impulsor [in]	6,5
Altura total [m]	12,6
Eficiencia	0,61
NPSHr [m]	2
Caudal [m³/h]	14,05

Evaluación energética

Se ha obtenido una potencia de la bomba de 481,88 [W]; sin embargo, esta es la potencia que recibe el fluido, por lo que se ha dividido este valor para la eficiencia encontrada en la tabla 6 para obtener el valor de 789,97 [W], que corresponde a la potencia que el motor eléctrico proporciona al impulsor para transmitirle el movimiento rotatorio. Al multiplicar esta potencia por el tiempo de funcionamiento determinado anteriormente en la tabla 2, se ha obtenido la energía que el equipo consume por semana, con un valor de 24490 [Wh]. En la figura 22, se ha graficado este valor junto a la capacidad de generación de la figura 11.

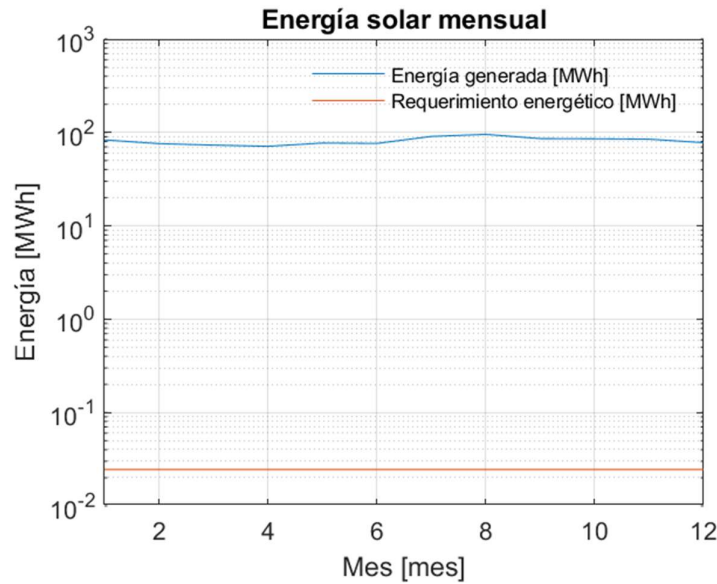


Figura 22. Energía generada por el sistema [MWh] y requerimiento energético del sistema [MWh]

3.2 Discusión de resultados

Los valores, gráficas y esquemas desarrollados en la sección anterior, son el resultado de una serie de consideraciones que se enlistan a continuación:

- La climatología de la ciudad de Quito es igual en toda su extensión, por lo que las estimaciones obtenidas son una generalización de su comportamiento real.
- El sistema se ubica en un terreno cuadrado y plano de una hectárea de superficie, en consecuencia, las formas y dimensiones se han seleccionado en función de este espacio.
- El estudio se realizó considerando un cultivo de papa en etapa final de desarrollo, así que los resultados solo son aplicables para este caso. Para otros cultivos y etapas de desarrollo, debe aplicarse la metodología utilizando los datos correspondientes.

Las figuras 3 y 4 muestran una gran cantidad de agua de lluvia y radiación solar disponibles en la ciudad de Quito. Sin embargo, son cantidades que vienen dadas por unidad de área, por lo que la cantidad aprovechable de los mismos no viene dada solo por la climatología de la ciudad de Quito, sino que depende del área de captación del sistema de recolección diseñado.

La aplicación seleccionada en el caso de estudio de este trabajo es el riego de cultivos y el método de irrigación seleccionado es el de riego por goteo. En la tabla 2 se muestra el caudal necesario para cubrir las pérdidas de agua por evapotranspiración del caso de

estudio analizado. Este caudal representa el flujo de agua que debe ingresar al cultivo para mantenerlo en buenas condiciones. Se debe tomar en cuenta que el mismo, a pesar de encontrarse en una zona lluviosa, no recibe agua por estar cubierto por los paneles fotovoltaicos, por lo que requiere ser regado todo el año. La necesidad estimada no corresponde a la necesidad máxima que el cultivo podría experimentar en todo su desarrollo, la necesidad máxima se da en la etapa de desarrollo media ($K_c = 1,05 - 1,2$). Entonces, el sistema no cubre la necesidad del cultivo en esta etapa, sin embargo, hay otras etapas del desarrollo del cultivo en las que el caudal proporcionado por el sistema supera su necesidad, como en la etapa inicial ($K_c = 0,4 - 0,5$), debido a que se utiliza un caudal constante. Esto presenta una oportunidad de disminuir el gasto de agua, en etapas de menor necesidad, con el fin de almacenarla para utilizarla en la etapa de necesidad máxima, una propuesta para esta solución se describe brevemente en la sección de "Recomendaciones" y se deja como trabajo futuro.

Gracias a las figuras 14 y 16, se verifica que el sistema diseñado es capaz de cubrir la necesidad del cultivo prácticamente en su totalidad, gracias a que la cantidad de lluvia recolectada por los módulos de captación es superior al caudal requerido. No obstante, hay semanas en las que esto no se cumple; en el primer año de operación del sistema hay 3 semanas en las que el caudal requerido supera el volumen de agua disponible. Desde el segundo año de operación en adelante, hay 1 semana en la que el requerimiento supera la disponibilidad. Durante dichas semanas no se lleva a cabo el riego; por lo que se deja a criterio del encargado del cultivo si prescindir del mismo o buscar una fuente alternativa de agua para regar el cultivo.

Se ha seleccionado un reservorio como almacenamiento pluvial en lugar de un tanque de almacenamiento, puesto que es el método más adecuado por el gran volumen de agua que se requiere almacenar. De acuerdo a la figura 17, se requiere almacenar un volumen máximo de 1470 [m³], por lo que se ha dimensionado un reservorio rectangular de 33 [m] de largo, 12 [m] de ancho y 3,7 [m] de profundidad. A pesar de sus grandes dimensiones, el reservorio todavía tiene espacio para ubicarse dentro del área de una hectárea considerada a cambio de disminuir el número de módulos de captación. Esto último no resulta un problema porque -sin esos módulos de captación- el sistema todavía puede satisfacer los requerimientos del cultivo.

El sistema debe contar con una bomba capaz de proporcionar el caudal requerido por el cultivo (14 [m³/h] aproximadamente) a una altura total igual a 11,15 [m] para lograr elevar el agua desde el fondo del reservorio y movilizarla al lugar más lejano dentro de la instalación como se ilustra en la figura 20. Los detalles de la bomba seleccionada se

encuentran en la tabla 6, donde se puede observar que la misma puede entregar una altura de 12,6 [m] con un caudal de 14 [m³/h]. Por lo tanto, la bomba logrará transportar el caudal a los lugares más lejanos de la instalación ya que supera el requerimiento de altura total mencionado anteriormente. La bomba también opera con el mismo caudal requerido por el cultivo, lo que asegura el suministro hídrico de la plantación. Así, el equipo de bombeo centrífugo Bell & Gossett Serie e-1510 modelo 1.25 AD presenta las mejores características de desempeño para la aplicación estudiada.

3.3 Conclusiones

En el trabajo desarrollado se ha diseñado un sistema de captación de agua de lluvia y radiación solar utilizando paneles fotovoltaicos. Los paneles fotovoltaicos actúan con un doble propósito: por un lado, desempeñan el papel de superficie de captación de agua de lluvia, capturando un volumen considerable de agua que es aprovechada en el riego del cultivo considerado en el caso de estudio. Por otro lado, también cumplen la función de generar energía eléctrica a partir de la radiación solar incidente sobre su superficie y los resultados reflejan que el sistema es capaz de generar una gran cantidad de energía eléctrica que será aprovechada en la operación del sistema diseñado. El hecho de que los paneles fotovoltaicos cumplan un doble propósito representa una gran ventaja en términos de espacio físico, ya que no se requieren elementos extra que cumplan con la tarea de recolectar el agua de lluvia, lo que hace al sistema mucho más compacto y aumenta su capacidad de generación de energía, debido a que pueden ubicarse más paneles en el mismo espacio físico.

El sistema diseñado cuenta con un área de aproximadamente el 40% de una hectárea, por lo que se pueden obtener grandes cantidades (hasta 95,40 [MWh] en el caso de la radiación solar y 334,93 [m³] en el caso del agua de lluvia) de cada recurso. Este resultado sugiere que es factible aprovechar ambos recursos renovables, no solo en el caso estudiado en el presente trabajo, sino en cualquier actividad que requiera agua y energía eléctrica dentro de la ciudad de Quito (siempre y cuando los requerimientos no superen la disponibilidad).

La energía generada por los paneles fotovoltaicos -que se encuentra en el rango de los [70MWh] a 100 [MWh]- es mucho mayor a la energía consumida por la bomba de agua que se ha estimado como 0,024 [MWh] al mes. Por lo tanto, los paneles fotovoltaicos pueden cubrir el total de demanda energética de la bomba y mantenerla funcionando bajo los parámetros establecidos en secciones anteriores durante todo el año, y aun así permitir que sobre una cantidad bastante grande de energía, que puede ser utilizada para alimentar otras áreas como casas dentro del mismo lugar de estudio (en el caso de tener un enfoque

de autoconsumo), o puede inyectarse a la red eléctrica pública y colaborar con la producción energética nacional.

El sistema diseñado ofrece una alternativa totalmente funcional e independiente ya que se abastece de recursos necesarios para su funcionamiento sin la ayuda de agentes externos como las redes públicas de agua potable y eléctrica.

Este sistema es una forma altamente eficiente de administrar el uso del suelo ya que, en lugar de destinar un espacio para generación eléctrica con paneles fotovoltaicos, otro para la captación y almacenamiento de agua de lluvia y un espacio más para el cultivo, combina las tres actividades en un solo lugar, triplicando la productividad agrícola y energética.

3.4 Recomendaciones

Si bien el sistema diseñado utiliza paneles fotovoltaicos como superficie de captación, no es necesario que se limiten solamente a estos, puesto que puede resultar complicado obtener una cantidad tan grande. Se pueden utilizar otras opciones como láminas de acero galvanizado o techos de policarbonato como complemento a los paneles fotovoltaicos, pero se debe tomar en cuenta que la generación de energía eléctrica disminuirá.

Se puede aumentar la exactitud de las estimaciones tomando datos específicos de la ubicación del sistema (por ejemplo, del sector de Guamaní) en lugar de datos representativos de la ciudad de Quito. De esta forma, se obtendrían predicciones más cercanas a la realidad del lugar de estudio.

Se recomienda considerar adaptar las formas de las estructuras y elementos constitutivos del sistema de captación con el fin de que se acomode a las condiciones geográficas del lugar en donde se encuentre, debido a que no siempre se tiene un terreno plano y cuadrado como el considerado en este trabajo, sino que pueden llegar a tener geometrías más complejas.

Se recomienda programar un script parecido al del ANEXO I que permita automatizar todos los cálculos que intervienen en el diseño de esta clase de sistemas, ya que pueden llegar a ser -hasta cierto punto- confusos y tediosos. Esto ahorraría mucho tiempo al momento de realizar el estudio para cultivos diferentes y en otras etapas de desarrollo.

Como trabajo futuro, se recomienda implementar un control sobre la bomba de agua para que varíe el caudal de acuerdo a la etapa de desarrollo en la que se encuentre el cultivo, así como utilizar emisores de caudal variable. Esto mejoraría notablemente la eficiencia del

agua, pues se proporcionaría solamente la cantidad necesaria, reservando el resto para momentos en donde el cultivo exija un caudal mayor.

Finalmente, se recomienda realizar un estudio económico para evaluar los costos y beneficios de implementar este sistema. A pesar de que la instalación puede requerir una inversión alta, se pueden recibir beneficios en concepto de ahorro en servicios básicos de agua y energía eléctrica gracias a que el sistema obtiene estos recursos por sí mismo, lo que le daría a la industria agrícola mayor autonomía y control sobre sus recursos.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Posso, «ENERGIA Y AMBIENTE: PASADO, PRESENTE Y FUTURO», . p.,
Accedido: 23 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en:
<https://www.redalyc.org/pdf/360/36050204.pdf>
- [2] C. M. ANTONIO, D. F. G. ADOLFO, F. G. JESÚS, H. G. ÁNGEL MIGUEL, D. J. S. MARÍA JOSÉ, y S. G. FLORENTINO, *Energías renovables para el desarrollo*. Ediciones Paraninfo, S.A., 2003.
- [3] H. Dinesh y J. M. Pearce, «The potential of agrivoltaic systems», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 299-308, feb. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.024.
- [4] «DATOS_HISTORICOS_REMMAQ». <http://datosambiente.quito.gob.ec/> (accedido 5 de julio de 2023).
- [5] P. Kajdic y X. Blanco-Cano, «EL SOL, NUESTRA ESTRELLA», *Revista Digital Universitaria*, 2009.
- [6] F. A. O. Landázuri, «MECANISMOS PARA LA PROMOCIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ECUADOR».
- [7] A. Lozano y D. Adriana, «Evaluación de la orientación y el ángulo de inclinación óptimo de una superficie plana para maximizar la captación de irradiación solar en Cuenca-Ecuador».
- [8] P. Peña y F. Pinos, «PARAMETRIZACIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS FOTOVOLTAICOS BASADO EN LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA CIUDAD DE CUENCA, APLICADO EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.»
Accedido: 6 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en:
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7123/1/UPS-CT003918.pdf>
- [9] D. A. Jiménez Rivera, «DISEÑO DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA PLUVIAL PARA USO DOMESTICO», 2021, Accedido: 1 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://redibai-myd.org/portal/wp-content/uploads/2021/10/d2-reducido.pdf#page=22>
- [10] K. Hirozumi, *GUÍA TÉCNICA PARA COSECHAR EL AGUA DE LLUVIA. OPCIONES TÉCNICAS PARA LA AGRICULTURA FAMILIAR EN LA SIERRA*. Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), 2015. Accedido: 1 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.jica.go.jp/Resource/project/ecuador/001/materials/ku57pq000011cym2-att/water_harvest_sp.pdf
- [11] Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (Sedema), «COSECHAR LA LLUVIA, MANUAL PARA INSTALAR UN SISTEMA DE CAPTACIÓN PLUVIAL EN TU VIVIENDA», 2020, Accedido: 1 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/storage/app/media/DGCPCA/ManualCosecharLaLluvia.pdf>
- [12] FAO, *EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO GUÍAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DE AGUA DE LOS CULTIVOS*. Accedido: 20 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- [13] M. Liotta, *SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO*. Accedido: 19 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.prosap.gov.ar/Docs/3-%20Sistema%20de%20riego%20por%20goteo.pdf>
- [14] «Riego por goteo | Diseño e Instalación de Sistemas de Riego Localizado». <https://www.novagric.com/es/riego/sistemas-de-riego/riego-por-goteo> (accedido 20 de agosto de 2023).
- [15] NETAFIM, *MANUAL DE RIEGO POR GOTEO CONCEPTOS BÁSICOS*. Accedido: 20 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en:

- <https://www.casadelriegoecuador.com/wp-content/uploads/2020/09/manual-de-riego-por-goteo-Netafim.pdf>
- [16] «NSRDB». <https://nsrdb.nrel.gov/> (accedido 5 de julio de 2023).
- [17] CONADI, «CÓMO DETERMINAR CUÁNTO Y CUÁNDO REGAR». Accedido: 20 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.conadi.gob.cl/>
- [18] «VaxaSoftware». <http://www.vaxasoftware.com/indexes.html> (accedido 20 de agosto de 2023).
- [19] «Ingeniería Elemental». <https://www.ingenieriaelemental.com/posts/carta-psicrometrica-online> (accedido 20 de agosto de 2023).
- [20] «Used Trina 255W Solar Panel Zep Frame | SanTan Solar». <https://www.santansolar.com/product/used-trina-255w-solar-panel-zep-frame/> (accedido 14 de agosto de 2023).
- [21] F. Muñoz, *MANUAL DEL CULTIVO DE PAPA*. Accedido: 21 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/807/4/iniapscm5.pdf>
- [22] «UniRam™ ASXR: Subsurface Irrigation System | Netafim». <https://www.netafim.com/en/products-and-solutions/product-offering/drip-irrigation-products/uniram/uniram-asxr/> (accedido 21 de agosto de 2023).
- [23] «Riego por Goteo». <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn207.html> (accedido 21 de agosto de 2023).
- [24] TIGRE, *POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD*.
- [25] «Bell & Gossett Series e-1510 Pump Model 1.25AD - 1 HP 1750 RPM 3 PH ODP». <https://www.statesupply.com/bh5224> (accedido 21 de agosto de 2023).
- [26] R. S. Ortiz y M. C. A, «Métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración de referencia para el Valle de Tumbaco», *Siembra*, vol. 7, n.º 1, Art. n.º 1, may 2020, doi: 10.29166/siembra.v7i1.1450.
- [27] TAVLIT, *FILTROS TAVLIT 2020*. Accedido: 21 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: http://www.tavlit-sp.com/Editor/assets/catalog_filters_2020_spanish_i06-20_fn.pdf

5 ANEXOS

ANEXO I. Script en Matlab para los datos de lluvia y radiación solar

```
clear
clc
close all

%CÁLCULOS SOLARES
DATOS=importdata("GHI tmy 2021.xlsx");
c=0;
for j=1:365
    irradiancia=[];
    for i=c+1:c+24
        irradiancia(i-c)=DATOS(i);
    end
    energia_diaria(j)=sum(irradiancia);
    c=c+24;
end

c1=0;
for k=1:12
    if k == 1 || k == 3 || k == 5 || k == 7 || k == 8 || k == 10 || k == 12
        dias=31;
    elseif k == 2
        dias=28;
    else
        dias=30;
    end
    energia_suma_mensual(k)=sum(energia_diaria(c1+1:c1+dias));
    grafica(c1+1:c1+dias)=energia_suma_mensual(k)*ones(1,dias);
    c1=c1+dias;
end

%CÁLCULOS GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA
modulos_por_fila=8;
filas=13;
bloques=2;
paneles_por_modulo=10;
numero_paneles=paneles_por_modulo*modulos_por_fila*filas*bloques;
potencia_panel=255;
energia_suma_mensual_W_m2=energia_suma_mensual.*(1/30).*(1/12);
horas_pico=energia_suma_mensual_W_m2.*(12*30/1000);
PV=numero_paneles*potencia_panel*horas_pico;
A_panel=1.64;
inclinacion=10;
A_horizontal_panel=A_panel*cos(inclinacion*pi/180);
A=A_horizontal_panel*numero_paneles;

%CÁLCULOS PLUVIALES
DATOS1=importdata("Lluvia 2022 guamani.xlsx");
c=0;
for j=1:365
    lluvia=[];
    for i=c+1:c+24
        lluvia(i-c)=DATOS1(i);
    end
end
```

```

    end
    lluvia_diaria(j)=sum(lluvia);
    c=c+24;
end

c1=0;
for k=1:52
    lluvia_suma_semanal(k)=sum(lluvia_diaria(c1+1:c1+7));
    grafica(c1+1:c1+7)=lluvia_suma_semanal(k)*ones(1,7);
    c1=c1+7;
end

%NECESIDAD HÍDRICA
ETo_mensual=[103.89,92.32,99.43,90.17,93.85,95.35,118.22,129.64,114.42,109.05,9
5.29,101.23];
Kc=0.9;
ETc_mensual=Kc.*ETo_mensual;
ETc_max=max(ETc_mensual);
ETA=0.9;
Dh=1.10;
Ds=0.5;
Ne=A/(Dh*Ds);
Qg=2.3;
PP=Ne*Qg/A;
TR=(12/52)*ETc_max/(PP*ETA);
QT=Ne*Qg;
QTs=QT*TR*1/1000;

%LLUVIA CAPTURADA
reserva_agua_semanal=(1/1000)*A*lluvia_suma_semanal;

%AGUA EN EL RESERVORIO
V_reservorio=[];
V_reservorio(1)=0;
Lluvia_captada=[];
for i=1:52
    Lluvia_captada_semanal=reserva_agua_semanal(i)+V_reservorio(i);
    V_reservorio(i+1)=Lluvia_captada_semanal-QTs;
    Lluvia_captada(i)=Lluvia_captada_semanal;

    if V_reservorio(i+1)<=0
        V_reservorio(i+1)=reserva_agua_semanal(i)+V_reservorio(i);

    else
    end
end

end

%DIMENSION DEL RESERVORIO
Ancho=12;
Altura=3.7;
Largo=max(V_reservorio)/(Ancho*Altura);

%DIMENSIONAMIENTO DE LA BOMBA
regantes_por_fila=3;
D_regante=14.2*10^-3; %m
L_regante=40.32; %m
P_regante=100000; %Pa

```

```

e_regante=0.0015*10^-3; %m
regantes=regantes_por_fila*filas*bloques;
Q_regante=(1/1000)*(QT/regantes)*(1/3600);
v_regante=4*Q_regante/(pi*(D_regante)^2);
Re_regante=reynolds(999.32,v_regante,D_regante,0.0011);
Perdida_regante=(colebrook(e_regante,D_regante,Re_regante)*(L_regante/(D_regant
e))*((v_regante^2)/(2*9.81)));

DT=64*10^-3;
vT=4*(QT/(1000*3600))/(pi*(DT)^2);
LT=20.5-8;
ReT=reynolds(999.32,vT,DT,0.0011);
PerdidaT=(colebrook(e_regante,DT,ReT)*(LT/(DT))*((vT^2)/(2*9.81)));

D_succion=76*10^-3;
v_succion=4*(QT/(1000*3600))/(pi*(D_succion)^2);
L_succion=Altura;
Re_succion=reynolds(999.32,v_succion,D_succion,0.0011);
Perdida_succion=(colebrook(e_regante,D_succion,Re_succion)*(L_succion/(D_succio
n))*((v_succion^2)/(2*9.81)));
NSPHd=7-L_succion-Perdida_succion;

D_secundaria=50*10^-3;
v_secundaria=4*(QT/(2*1000*3600))/(pi*(D_secundaria)^2);
L_secundaria=83.6+8;
Re_secundaria=reynolds(999.32,v_secundaria,D_secundaria,0.0011);
Perdida_secundaria=(colebrook(e_regante,D_secundaria,Re_secundaria)*(L_secundar
ia/(D_secundaria))*((v_secundaria^2)/(2*9.81)));
Perdidas_mayores=PerdidaT+Perdida_secundaria+Perdida_regante+Perdida_succion;

K_c=0.9;
K_v=0.2;
K_d=2;
K_t=0.3;
Perdida_codo1=K_c*vT^2/(2*9.81);
Perdida_codo2=K_c*v_secundaria^2/(2*9.81);
Perdida_filtro=5000/(999.03*9.81);
Perdida_valvula=K_v*vT^2/(2*9.81);
Perdida_derivaciones=39*K_d*v_secundaria^2/(2*9.81);
Perdida_tee=K_t*v_secundaria^2/(2*9.81);
Perdidas_menores=Perdida_codo1+Perdida_codo2+Perdida_filtro+Perdida_valvula+Per
dida_derivaciones+Perdida_tee;

Perdidas_totales=Perdidas_mayores+Perdidas_menores;
hB=Altura+Perdidas_totales;
ETA=0.61;
hB_nuevo=12.6;

%EVALUACIÓN ENERGÉTICA
Potencia_bomba=999.03*(QT/(1000*3600))*9.81*hB_nuevo;
Potencia_entrada=Potencia_bomba/ETA;
Energia_consumida=Potencia_entrada*TR*52/12;

%GRÁFICAS
dia2=1:12;
grafica3=mean(energia_suma_mensual)*ones(1,12);
subplot(2,3,1)
plot(dia2,energia_suma_mensual.*1e-3)

```



```

axis([1 12 130 190])
grid on
hold on
plot(dia2,grafica3.*1e-3)
hold off
title("GHI mensual")
xlabel("Mes del año [mes]")
ylabel("Irradiancia [kWh/m^2 mes]")
legend("GHI mensual [kWh/m^2]", "GHI mensual promedio [kWh/m^2]", "FontSize",8)
legend("boxoff")

subplot(2,3,4)
plot(1:52,lluvia_suma_semanal)
grid on
hold on
plot(1:52, mean(lluvia_suma_semanal)*ones(1,52))
title("Precipitación semanal")
xlabel("Semana del año [semana]")
ylabel("Precipitación [mm]")
legend("Precipitación semanal [mm]", "Precipitación promedio [mm]", "FontSize",8)
legend("boxoff")
hold off

subplot(2,3,2)
semilogy(dia2,PV.*1e-6)
grid on
axis([1 12 10^-2 10^3])
title("Energía solar mensual")
xlabel("Mes [mes]")
ylabel("Energía [MWh]")
hold on
semilogy(1:12, (Energia_consumida*10^-6)*ones(1,12))
legend("Energía generada [MWh]", "Requerimiento energético [MWh]", "FontSize",8)
legend("boxoff")
hold off

subplot(2,3,5)
plot(1:52,reserva_agua_semanal)
grid on
title("Precipitación capturada")
xlabel("Semana del año [semana]")
ylabel("Volumen [m^3]")

subplot(2,3,6)
plot(0:52,V_reservorio)
grid on
title("Volumen de agua en el reservorio")
xlabel("Semana del año [semana]")
ylabel("Volumen [m^3]")

subplot(2,3,3)
plot(1:52,Lluvia_captada)
axis([0 52 0 1800])
grid on
title("Lluvia capturada")
xlabel("Semana del año [semana]")
ylabel("Volumen [m^3]")
hold on

```

```
plot(1:52,QTs*ones(1,52))
legend("Volumen disponible [m^3]", "Necesidad del cultivo [m^3]", "FontSize", 8)
legend("boxoff")
hold off
```

```
function Re=reynolds(rho,v,D,mu)
    Re=(rho*v*D)/mu;
end
```

```
function f=colebrook(e,D,Re)
    f=(0.25)/((log10((e/(3.7*D))+5.74/(Re)^0.9)))^2);
end
```

ANEXO II. Evapotranspiración de referencia mensual para la estación La Tola (ET_o) [26]

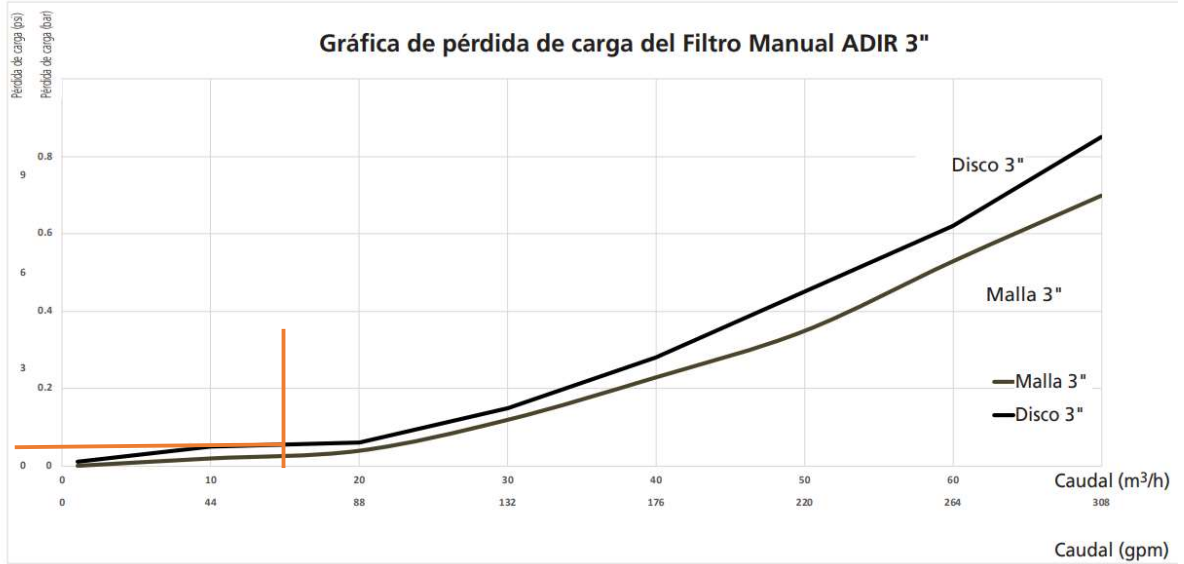
	ET _o $\left[\frac{\text{mm}}{\text{mes}} \right]$
Enero	103,89
Febrero	92,32
Marzo	99,43
Abril	90,17
Mayo	93,85
Junio	95,35
Julio	118,22
Agosto	129,64
Septiembre	114,42
Octubre	109,05
Noviembre	95,29
Diciembre	101,23

ANEXO III. Coeficientes de cultivo referenciales (K_c) [17]

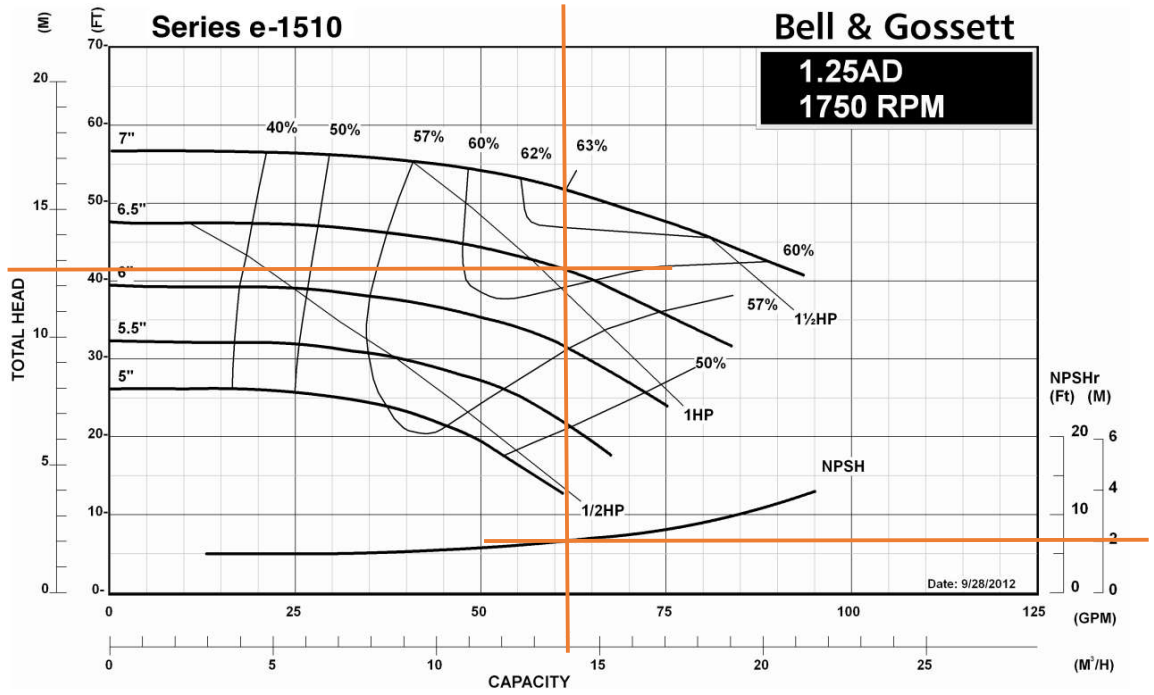
	Inicial	Desarrollo	Medios	Finales	Cosecha
Ajo	0.20	0.30-0.40	0.40-0.45	0.45-0.65	0.55
Alfalfa	0.30-0.40	-	-	-	1.05-1.20
Almendro	0.53	0.59	0.95	1.02	1.00
Arándano 1º año	0.11	0.23	0.31	0.34	0.33
Arándano 2º año	0.14	0.32	0.42	0.45	0.42
Arándano 3º año	0.21	0.35	0.45	0.50	0.49
Arroz	1.10-1.15	1.10-1.50	1.10-1.30	0.95-1.10	0.95-1.05
Arveja, fresca	0.40-0.50	0.70-0.85	1.05-1.20	1.00-1.15	0.95-1.10
Cebolla seca	0.40-0.60	0.70-0.80	0.95-1.10	0.85-0.90	0.75-0.85
Cebolla verde	0.40-0.60	0.60-0.75	0.95-1.05	0.95-1.10	0.95-1.05
Ciruelo	0.53	0.62	0.98	1.07	1.06
Coliflor	0.4-0.50	0.70-4.8	0.95-1.10	0.90-1.00	0.80-0.95
Duraznero	0.53	0.62	0.98	1.07	1.06
Espárragos	0.40	0.48	0.50	0.80	0.82
Frambuesa	0.45	0.51	0.55	0.69	0.75
Kiwi	0.63	0.68	1.14	1.24	1.20
Maíz dulce	0.30-0.50	0.70-0.90	1.05-1.20	1.00-1.15	0.95-1.10
Maíz grano	0.30-0.50	0.70-0.85	1.05-1.20	0.80-0.95	0.55-0.60
Maní	0.40-0.50	0.70-0.80	0.95-1.10	0.75-0.80	0.55-0.60
Manzano	0.54	0.65	1.05	1.16	1.13
Maravilla	0.30-0.40	0.70-0.80	1.05-1.20	0.70-0.80	0.35-0.45
Nectarino	0.53	0.62	0.98	1.07	1.06
Nogal	0.53	0.58	0.91	1.07	1.06
Olivo	-	-	-	-	-
Palto	0.77	0.78	0.76	0.77	0.78
Papa	0.40-0.50	0.70-0.80	1.05-1.20	0.85-0.9	0.70-0.75
Peral	0.54	0.65	1.05	1.16	1.13
Pimentón	0.30-0.40	0.60-0.75	0.95-1.10	0.85-1.00	0.80-0.90
Poroto seco	0.30-0.40	0.70-0.80	1.05-1.20	0.65-0.70	0.25-0.3
Poroto vade	0.30-0.40	0.65-0.75	0.95-1.05	0.9-0.95	0.85-0.95
Pradera	0.79	0.82	0.91	0.95	0.92
Remolacha	0.40-0.50	0.75-0.85	1.05-1.20	0.9-1.00	0.60-0.70
Sandía	0.40-0.50	0.70-0.80	0.95-1.05	0.80-0.90	0.65-0.75
Tabaco	0.30-0.40	0.70-0.80	1.00-1.20	0.90-1.00	0.75-0.85
Tomate	0.40-0.50	0.70-0.80	1.05-1.25	0.80-0.95	0.60-0.65
Tngo	0.30-0.40	0.70-0.80	1.05-1.20	0.65-0.70	0.20-0.25
Vid	0.35-0.55	0.60-0.80	0.70-0.90	0.60-0.80	0.55-0.70

**ANEXO IV. Gráfica de pérdida de carga para el filtro seleccionado
[27]**

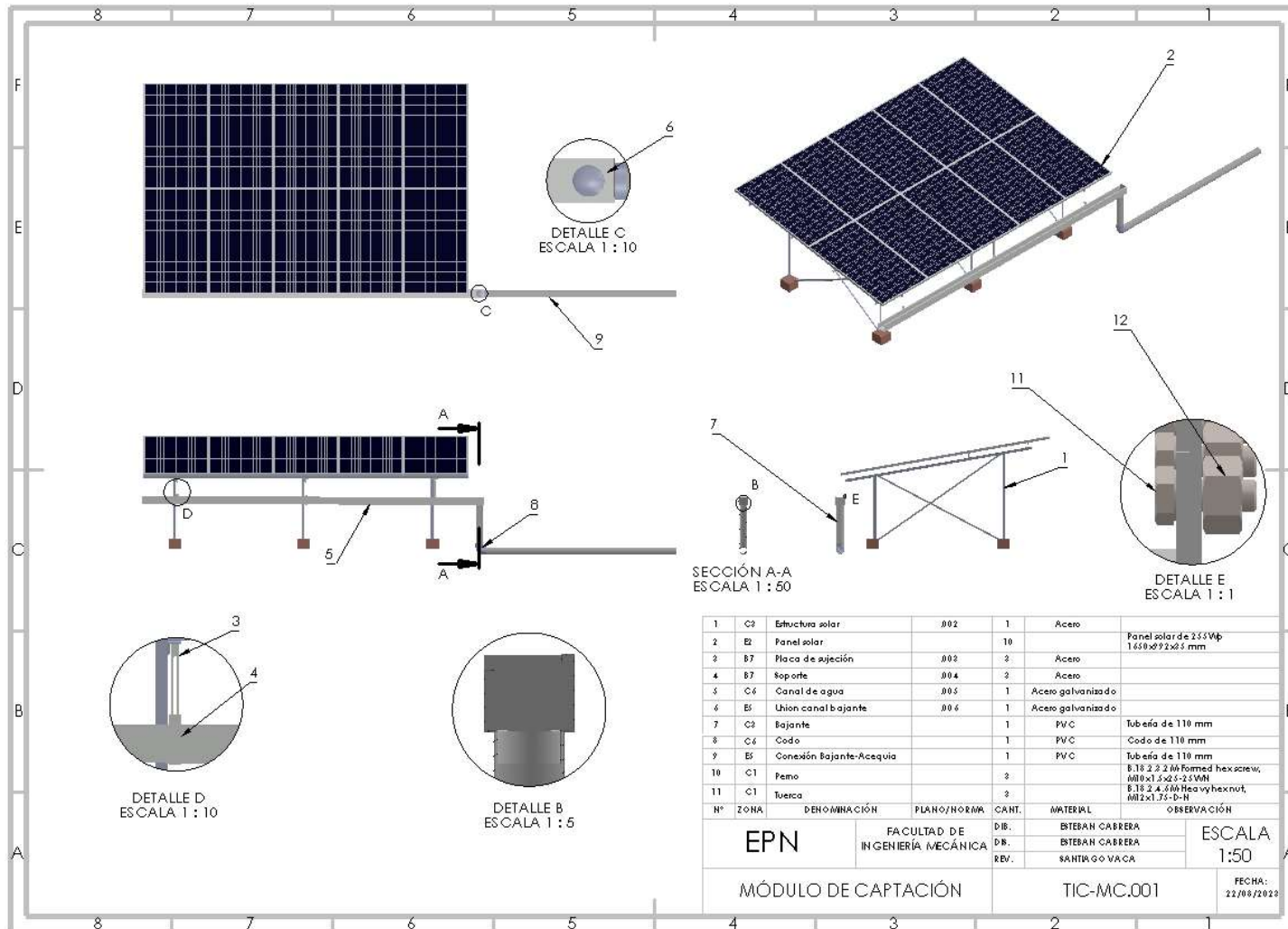
PÉRDIDA DE CARGA DEL FILTRO ADIR DE 3 "

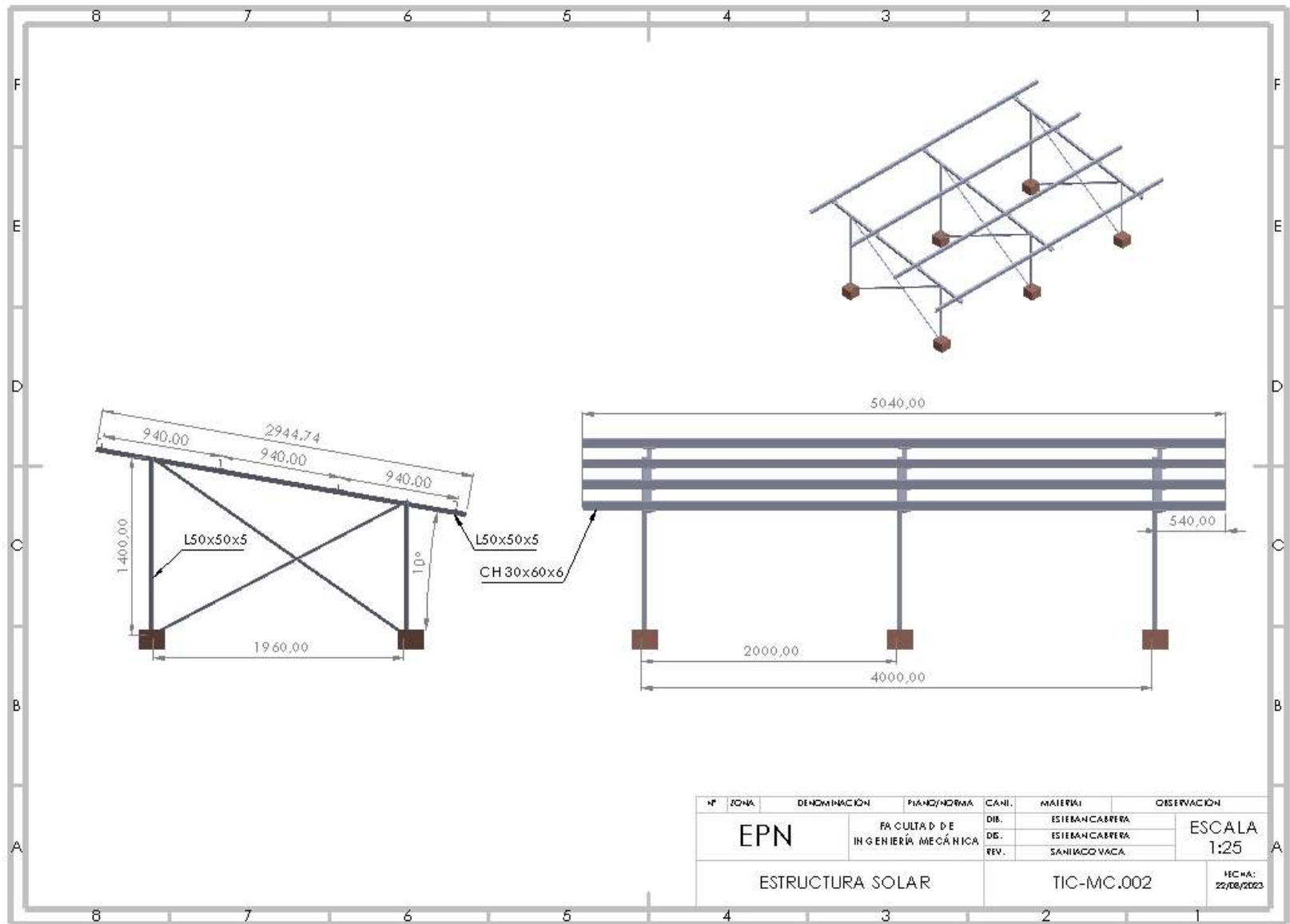


ANEXO V. Curvas de rendimiento de la bomba seleccionada [25]

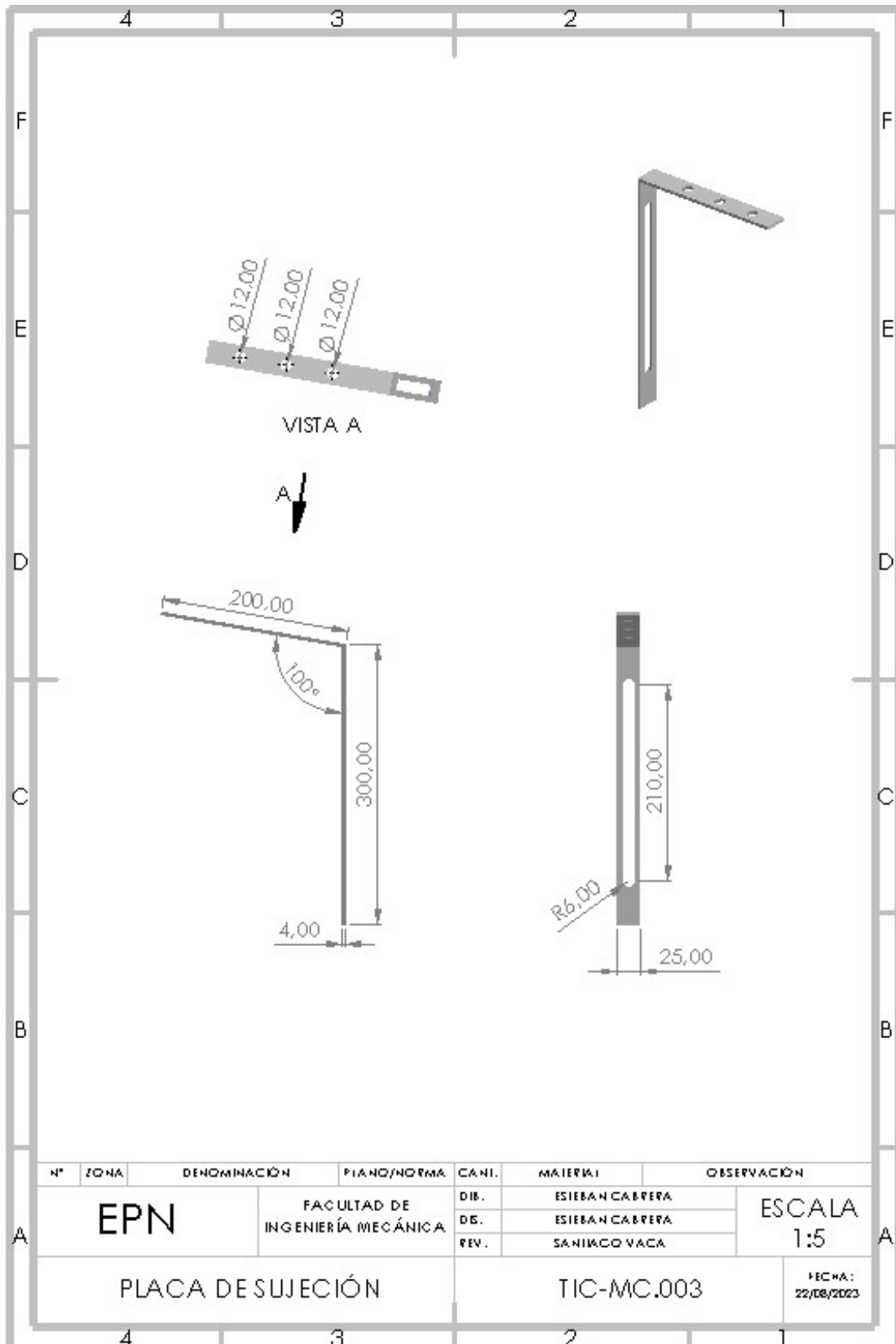


ANEXO VI. Planos

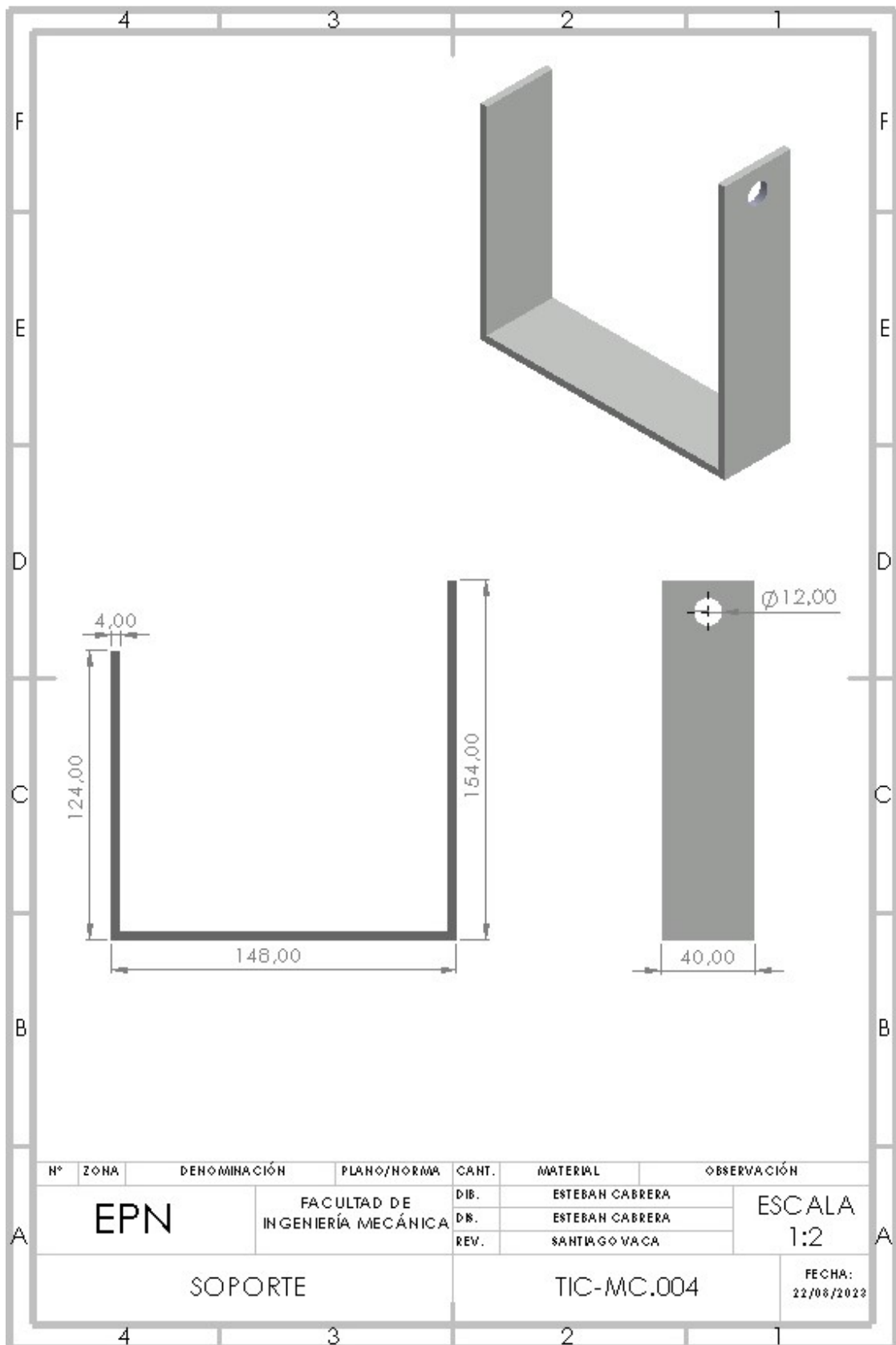




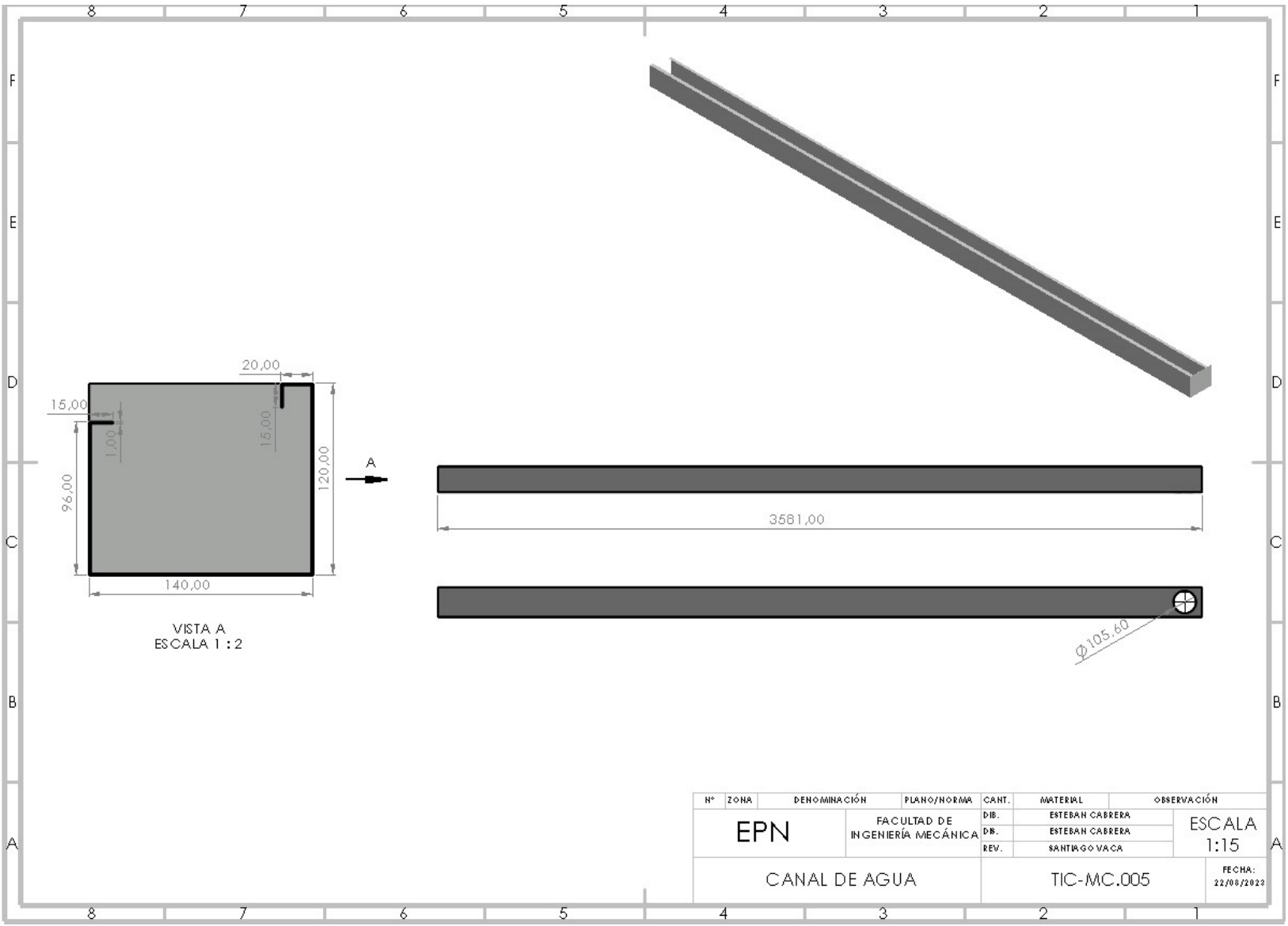
Nº	ZONA	DENOMINACIÓN	PLANO/NORMA	CANI.	MATERIAL	OBSERVACIÓN
	EPN	FA C U L T A D D E I N G E N I E R Í A M E C Á N I C A			ESTERAN CABRERA	ESCALA 1:25
					ESTERAN CABRERA	
					SANILCO VACA	
ESTRUCTURA SOLAR					TIC-MC.002	FECHA: 22/08/2003

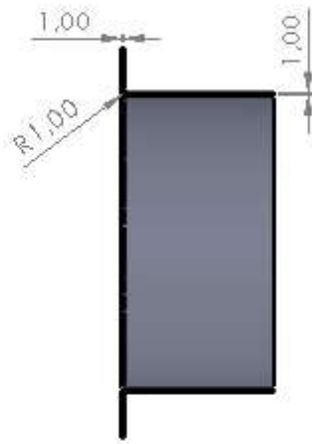
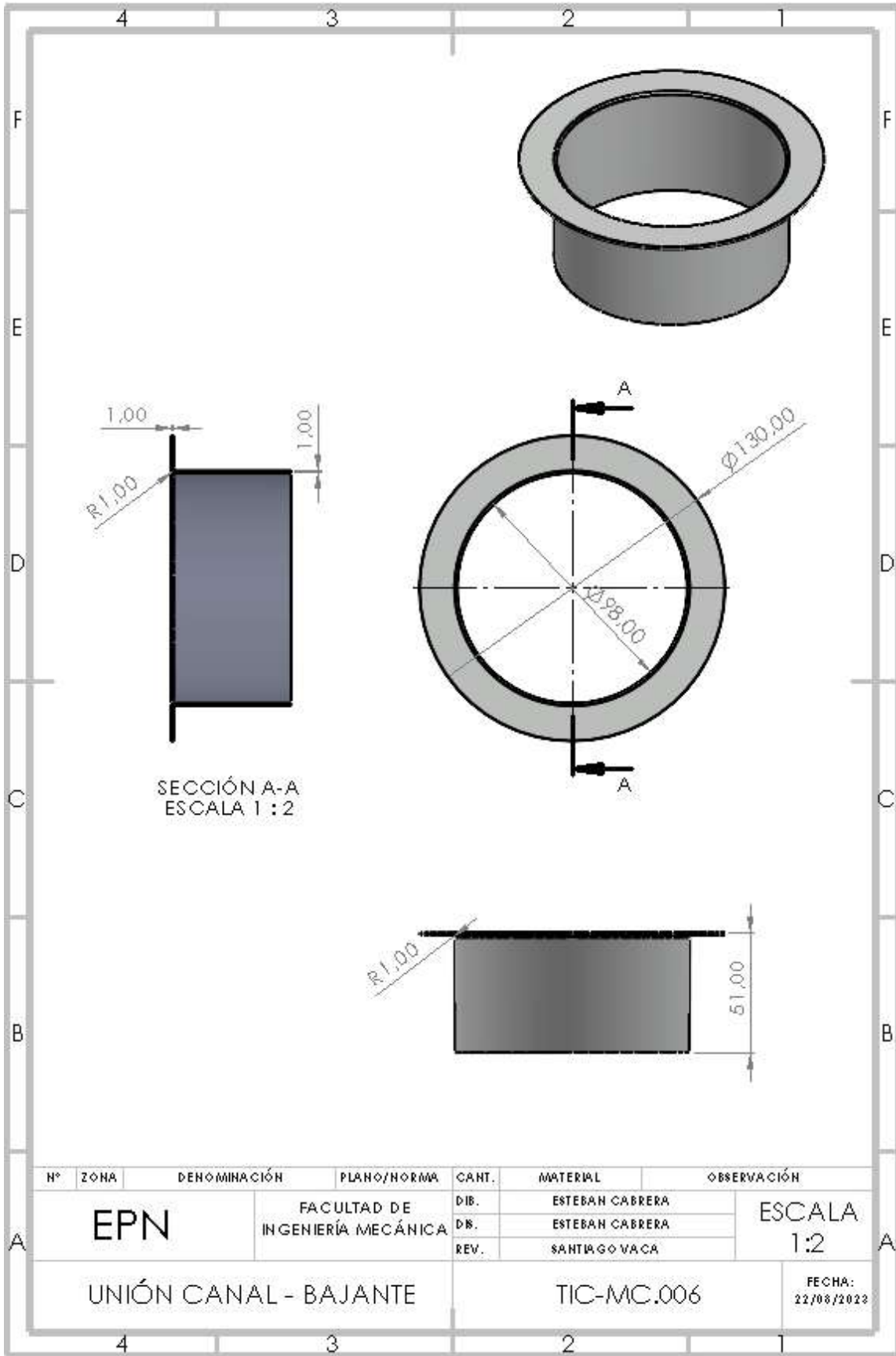


N°	ZONA	DENOMINACIÓN	PLANO/NORMA	CA. NI.	MATERIA	OBSERVACIÓN
EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	PLACA DE SUJECIÓN	TIC-MC.003	DIB.	ESIEBAN CABRERA	ESCALA 1:5
				DE.	ESIEBAN CABRERA	
				REV.	SANIAGO VACA	
				FECHA:		22/08/2023

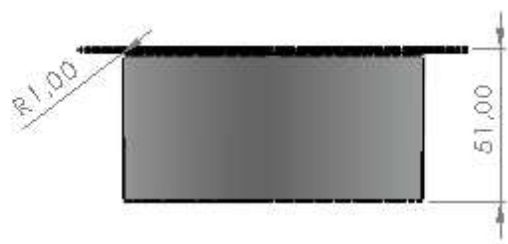
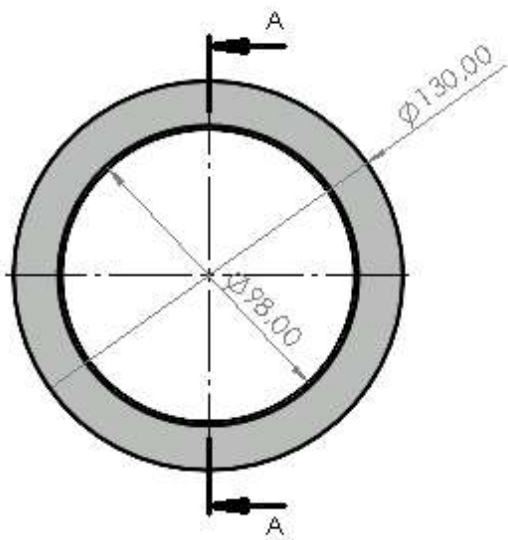


N°	ZONA	DENOMINACIÓN	PLANO/NORMA	CANT.	MATERIAL	OBSERVACIÓN
	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		DIB.	ESTEBAN CABRERA	ESCALA 1:2
				DR.	ESTEBAN CABRERA	
				REV.	SANTIAGO VACA	
SOPORTE				TIC-MC.004		FECHA: 22/08/2022





SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 2



N°	ZONA	DEHOMINACIÓN	PLANO/NORMA	CANT.	MATERIAL	OBSERVACIÓN
	EPN	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		DIB.	ESTEBAN CABRERA	ESCALA 1:2
				DB.	ESTEBAN CABRERA	
				REV.	SANTIAGO VACA	
UNIÓN CANAL - BAJANTE				TIC-MC.006		FECHA: 22/08/2022