

Metodología estructurada para el diseño de sistemas de riego agrícola mediante energía fotovoltaica

Samantha Lazara Cáceres Fuente

E-MAIL:

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”. La Habana, Cuba.

Daniela Córdova de HortaE-MAIL: danielitach096@gmail.com

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”. La Habana, Cuba.

RESUMEN

La creciente demanda hídrica y energética en la agricultura ha impulsado el desarrollo de sistemas de riego alimentados mediante energía solar fotovoltaica como alternativa sostenible y eficiente. El presente trabajo propone una metodología integrada para el diseño de sistemas de riego por aspersión, basada en la articulación de variables agronómicas, hidráulicas y energéticas. La metodología se estructura en etapas secuenciales que incluyen la caracterización física y climática, la determinación de los requerimientos hídricos, el diseño y modelación hidráulica de la red, el dimensionamiento del sistema de bombeo y el diseño energético fotovoltaico. El enfoque metodológico incorpora herramientas de simulación y criterios de eficiencia orientados a garantizar estabilidad hidráulica, uniformidad de riego y compatibilidad energética. Como resultado, se establece una metodología técnicamente estructurada para el desarrollo de sistemas de riego energéticamente autosuficientes y ambientalmente sostenibles.

PALABRAS CLAVE: *riego agrícola, energía fotovoltaica, modelación hidráulica, diseño integrado, sostenibilidad*

Structured methodology for the design of agricultural irrigation systems using photovoltaic energy

ABSTRACT

The growing demand for water and energy in agriculture has driven the development of photovoltaic solar-powered irrigation systems as a sustainable and efficient alternative. This paper proposes an integrated methodology for the design of sprinkler irrigation systems, based on the integration of agronomic, hydraulic, and energy variables. The methodology is structured in sequential stages that include physical and climatic characterization, determination of water requirements, hydraulic network design and modeling, pump system sizing, and photovoltaic energy design. The methodological approach incorporates simulation tools and efficiency criteria aimed at ensuring hydraulic stability, irrigation uniformity, and energy compatibility. As a result, a technically structured methodology is established for the development of energy-self-sufficient and environmentally sustainable irrigation systems.

KEYWORDS: *agricultural irrigation, photovoltaics, hydraulic modeling, integrated design, sustainability*

01 INTRODUCCIÓN

La agricultura constituye una de las actividades de mayor consumo hídrico y energético a escala mundial (Barrueto Guzmán et al., 2018). El incremento sostenido de la demanda alimentaria, unido al agotamiento progresivo de los combustibles fósiles y al incremento de los costos energéticos, ha favorecido el desarrollo de

tecnologías orientadas a mejorar la eficiencia de los sistemas de producción agrícola (Gevorkov et al., 2023; Habib et al., 2023).

Dentro de estas tecnologías, los sistemas de riego presurizado alimentados mediante energía solar fotovoltaica han adquirido una importancia creciente debido a su capacidad para reducir costos operacionales, disminuir emisiones contaminantes y favorecer la autosuficiencia energética en zonas agrícolas (Bawa et al., 2025; Mérida García et al., 2018). La utilización de energía solar aplicada al bombeo de agua resulta particularmente favorable en sistemas de riego por aspersión, debido a la coincidencia temporal entre los períodos de mayor radiación solar y las mayores demandas hídricas de los cultivos.

No obstante, el diseño de este tipo de instalaciones constituye un problema multidisciplinario que involucra simultáneamente variables agronómicas, hidráulicas y energéticas (Navarro-González et al., 2023). En numerosos casos, los procedimientos de diseño se desarrollan de manera independiente, provocando incompatibilidades entre la demanda hidráulica del sistema de riego y la capacidad energética disponible en el sistema fotovoltaico (Hassan et al., 2024). Asimismo, las pérdidas de carga en las redes presurizadas, las variaciones de presión y la fluctuación de la radiación solar introducen limitaciones operativas que afectan la estabilidad y eficiencia del sistema (Gutierrez et al., 2021).

Resulta necesaria la implementación de metodologías integrales que permitan desarrollar el diseño de sistemas de riego desde un enfoque sistémico, incorporando herramientas de simulación hidráulica y criterios de eficiencia energética capaces de garantizar estabilidad operacional, sostenibilidad técnica y racionalidad energética.

El presente trabajo propone una metodología integrada para el diseño de sistemas de riego por aspersión alimentados mediante energía solar fotovoltaica, estructurada en etapas metodológicas secuenciales que permiten articular de manera lógica y progresiva las diferentes fases del diseño agronómico, hidráulico y energético del sistema.

02 MARCO METODOLÓGICO

2.1. Estructura general de la metodología

La metodología propuesta para el diseño de sistemas de riego por aspersión alimentados mediante energía solar fotovoltaica se fundamenta en un enfoque integrado que articula de manera secuencial los componentes agronómicos, hidráulicos y energéticos del sistema. Esta metodología se estructura en seis bloques principales que representan las etapas fundamentales del proceso de diseño.

El primer bloque corresponde a la caracterización integral de las condiciones físicas y climáticas del área de estudio, considerando variables topográficas, edáficas y climáticas que condicionan el comportamiento del sistema. El segundo bloque se orienta a la determinación de los requerimientos hídricos del cultivo, estableciendo parámetros como la evapotranspiración, la lámina de riego, la frecuencia de aplicación y el caudal de diseño.

El tercer bloque abarca el diseño hidráulico de la red de riego y su modelación computacional, mediante la evaluación de caudales, presiones, velocidades y pérdidas de carga. El cuarto bloque corresponde al dimensionamiento del sistema de bombeo, a partir de la demanda hidráulica y las condiciones operacionales del sistema. El quinto bloque se enfoca en el diseño del sistema fotovoltaico, considerando la demanda energética y la disponibilidad de radiación solar para la selección de sus componentes principales. Finalmente, el sexto bloque integra la evaluación global del sistema, analizando su desempeño hidráulico y energético, así como su eficiencia y sostenibilidad (Fig. 2.1).

Esta estructura permite desarrollar un procedimiento sistemático de diseño, integrando de forma coherente las diferentes etapas del sistema y garantizando la compatibilidad entre la demanda hídrica, la respuesta hidráulica y la capacidad energética disponible.

2.2. Caracterización del área de estudio

El primer bloque de la metodología corresponde a la caracterización integral del área de estudio. Para ello se analizan las condiciones físicas, climáticas, edáficas e hidrológicas que influyen directamente en el comportamiento operacional del sistema y en la determinación de la demanda hídrica del cultivo.

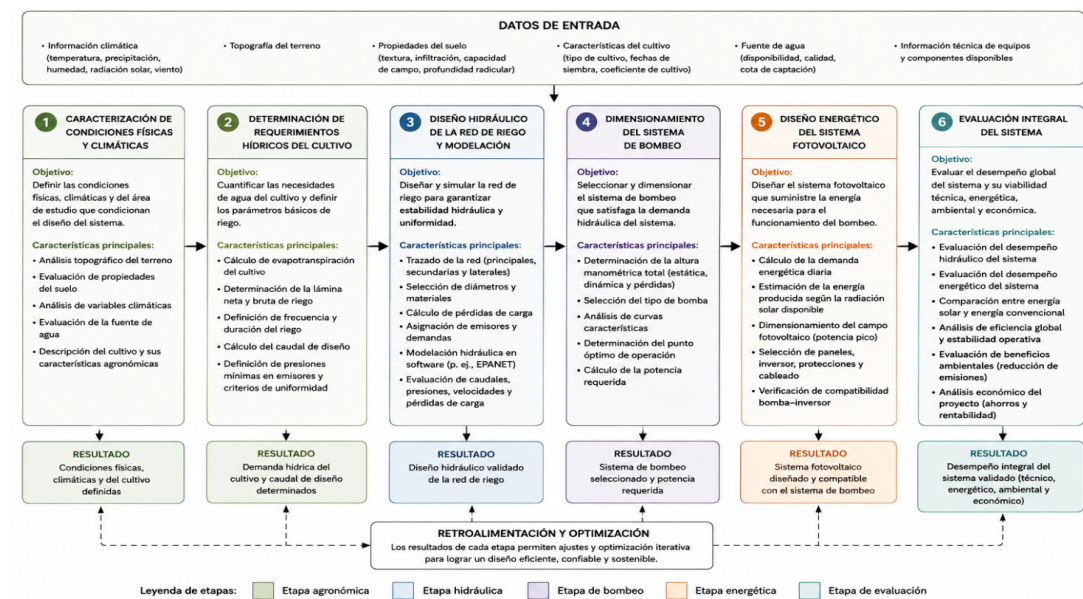


Figure 2.1. Esquema de la metodología integrada para el diseño de sistemas de riego por aspersión alimentados con energía solar fotovoltaica.

Para la caracterización topográfica del terreno se emplean modelos digitales del terreno (MDT), curvas de nivel y levantamientos topográficos, permitiendo evaluar pendientes, cotas, desniveles y geometría del área agrícola. Se utilizan herramientas CAD y estaciones topográficas que facilitan la generación de superficies TIN, perfiles longitudinales y representación espacial de la red hidráulica. Este análisis resulta fundamental para determinar la distribución de presiones, las pérdidas de carga y el comportamiento hidráulico de las tuberías y emisores dentro del sistema de riego.

La caracterización física del suelo comprende el análisis de propiedades hidráulicas y mecánicas relevantes para el manejo del agua en el perfil radicular. Se evalúan parámetros como densidad aparente, capacidad de infiltración, retención de humedad y profundidad efectiva de raíces. Asimismo, se consideran análisis granulométricos para determinar la proporción de arenas, limos y arcillas presentes en el suelo, permitiendo clasificar su comportamiento hidráulico y estimar su capacidad de almacenamiento de agua (Mesele et al., 2024). Se realizan ensayos de infiltración in situ y análisis edafológicos orientados a determinar la velocidad máxima de absorción del agua, evitando pérdidas por escorrentía superficial y favoreciendo la uniformidad del riego (Vishwakarma et al., 2025).

La evaluación climática incorpora variables meteorológicas fundamentales para la estimación de la evapotranspiración y los requerimientos hídricos del cultivo. Los datos son obtenidos mediante registros de estaciones meteorológicas, pluviómetros y bases climáticas locales, incluyendo temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, precipitación y radiación solar incidente. A partir de estos registros se elaboran hietogramas, series temporales de precipitación y análisis de variación horaria y diaria de la radiación solar, herramientas que permiten caracterizar el comportamiento climático del área y establecer las condiciones reales de operación del sistema de riego (Cauteruccio & Lanza, 2023).

La precipitación es analizada mediante registros pluviométricos históricos, permitiendo evaluar la distribución temporal de las lluvias, la ocurrencia de eventos extremos y la disponibilidad natural de agua para el cultivo. Por su parte, la radiación solar se estudia a través de curvas de variación horaria y diaria, fundamentales para el posterior dimensionamiento energético del sistema fotovoltaico y la determinación de las horas solares picos disponibles en el sitio.

La metodología considera además el análisis hidrológico e hidráulico de la fuente de abasto de agua, evaluando disponibilidad hídrica, condiciones de captación, variaciones de caudal y características del suministro. Para ello pueden emplearse hidrogramas y registros de comportamiento hidráulico que permiten verificar la compatibilidad

entre la oferta de agua y la demanda requerida por el sistema de riego.

2.3. Determinación de los requerimientos hídricos del cultivo

En esta fase metodológica se determinan los requerimientos hídricos del cultivo y se establecen los parámetros hidráulicos fundamentales para el diseño del sistema de riego. El procedimiento se basa en métodos agrometeorológicos que integran variables climáticas, características del cultivo y propiedades físicas del suelo, permitiendo estimar con precisión la demanda de agua bajo diferentes condiciones de operación.

La estimación de la demanda hídrica se realiza a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_o), calculada mediante información meteorológica obtenida de estaciones climáticas y registros pluviométricos. Para ello se consideran variables como temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, precipitación y radiación solar, las cuales permiten representar el comportamiento atmosférico y las condiciones reales de evaporación y transpiración del cultivo.

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se determina mediante la incorporación del coeficiente de cultivo (K_c), el cual varía según las etapas fenológicas y el grado de desarrollo vegetativo de la plantación. Este coeficiente permite representar las variaciones temporales del consumo de agua durante el ciclo agrícola y constituye un parámetro esencial para evitar tanto el déficit hídrico como el sobredimensionamiento del sistema (Carrión et al., 2001; Martín-Benito, 1991). La relación utilizada se expresa en la ecuación (2.1):

$$ET_c = K_c \cdot ET_o \quad (2.1)$$

Donde: ET_c es la evapotranspiración del cultivo (mm/día); K_c es el coeficiente del cultivo (adimensional); y ET_o es la evapotranspiración de referencia (mm/día).

A partir de la evapotranspiración del cultivo se determina la lámina neta de riego, considerando el intervalo de aplicación y la capacidad de almacenamiento hídrico del suelo. Este análisis permite establecer la cantidad de agua necesaria para reponer el déficit acumulado en el perfil radicular, manteniendo condiciones adecuadas de humedad para el desarrollo del cultivo y evitando pérdidas por percolación profunda o escorrentía superficial.

La metodología incorpora además criterios asociados a eficiencia de aplicación y uniformidad de distribución del agua, elementos fundamentales para garantizar el funcionamiento hidráulico adecuado del sistema de riego por aspersión. Se evalúan parámetros relacionados con infiltración, velocidad de aplicación y capacidad de absorción del suelo, verificando que la intensidad de precipitación de los aspersores sea inferior a la velocidad máxima de infiltración del terreno. Este criterio permite reducir pérdidas por escurrimiento superficial y mejorar el aprovechamiento del recurso hídrico.

Durante esta etapa también se definen las condiciones operacionales de los emisores hidráulicos, incluyendo presión mínima de funcionamiento, espaciamiento entre aspersores, caudal unitario y uniformidad de descarga. Estas variables son esenciales para asegurar una aplicación homogénea del agua en toda el área irrigada y mantener estabilidad hidráulica dentro de la red. Asimismo, se establece la organización funcional de los laterales de riego y la simultaneidad de operación de los sectores hidráulicos.

El caudal de diseño del sistema se determina a partir del número de laterales que operan simultáneamente y del caudal requerido por cada lateral, empleando la ecuación (2.2):

$$Q_d = q \cdot A \quad (2.2)$$

Donde: Q_d es el caudal de diseño del sistema (l/s); q es el hidromódulo de riego (l/s/ha); y A es el área total a regar (ha).

Se considera el cálculo del hidromódulo de riego y del caudal total requerido por el sistema, parámetros que permiten definir el dimensionamiento hidráulico de tuberías, válvulas, emisores y equipos de bombeo. Estos cálculos constituyen la base para la posterior modelación hidráulica en programas especializados como EPANET, donde se analizan presiones, velocidades, pérdidas de carga y comportamiento operativo de la red.

2.4. Diseño hidráulico de la red de riego

El tercer bloque metodológico corresponde al diseño hidráulico de la red de distribución de agua, etapa en la cual se define la configuración estructural y funcional del sistema de riego, integrando tuberías principales, secundarias y laterales, así como elementos de control como válvulas, hidrantes y emisores. Esta fase determina el comportamiento hidráulico global del sistema y su eficiencia operativa.

El diseño hidráulico se basa en el análisis del flujo en conducciones presurizadas, considerando variables como caudal, velocidad, presión y pérdidas de energía. Estos parámetros permiten asegurar una distribución uniforme del agua y garantizar condiciones de operación adecuadas en cada punto de emisión, evitando variaciones que puedan comprometer la uniformidad del riego.

Uno de los aspectos fundamentales en esta etapa es la determinación de las pérdidas de carga, las cuales se calculan a partir de relaciones derivadas de la mecánica de fluidos. Estas pérdidas dependen de la longitud de las tuberías, el diámetro interno, la rugosidad del material y la velocidad del flujo. Para su estimación se emplea la ecuación de Darcy-Weisbach (2.3):

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (2.3)$$

Donde: h_f es la pérdida de carga total por fricción (m); f es el factor de fricción de Darcy (adimensional); L es la longitud de tubería (m); D es el diámetro interno de la tubería (m); V es la velocidad del flujo (m/s); y g es la aceleración de la gravedad (m/s^2).

El análisis hidráulico incluye además la verificación de velocidades permisibles dentro de las conducciones, con el objetivo de evitar sedimentación en el caso de bajas velocidades o erosión interna en el caso de velocidades elevadas. Asimismo, se evalúa la distribución de presiones en toda la red, asegurando que los emisores operen dentro de rangos óptimos de funcionamiento y mantengan una descarga uniforme.

Para la selección de diámetros comerciales de tuberías se consideran criterios de eficiencia hidráulica y optimización económica. Este proceso busca minimizar pérdidas de energía, reducir costos de instalación y garantizar un adecuado equilibrio entre capacidad de conducción y consumo energético del sistema de bombeo.

El diseño contempla la organización espacial de la red hidráulica, definiendo la disposición de los sectores de riego y la simultaneidad de operación de los distintos ramales. Esta configuración permite controlar el caudal demandado en cada etapa de funcionamiento y facilita la regulación de presiones mediante válvulas de control y dispositivos de regulación.

2.5. Modelación y simulación hidráulica

Una vez definida la configuración hidráulica de la red, se desarrolla la etapa correspondiente a la modelación y simulación computacional del sistema, cuyo propósito es representar el comportamiento hidráulico de la instalación bajo diferentes condiciones operacionales y verificar el cumplimiento de los criterios de diseño previamente establecidos. Esta fase permite validar técnicamente el funcionamiento de la red antes de su implementación física, reduciendo incertidumbres asociadas al desempeño hidráulico y energético del sistema de riego.

La modelación computacional se desarrolla mediante herramientas especializadas de análisis hidráulico, como EPANET, las cuales permiten simular el comportamiento del flujo en conducciones presurizadas considerando condiciones reales de operación. A través de estos modelos se evalúan variables fundamentales como caudales, velocidades de circulación y pérdidas de carga (Rossman, 2001). También es posible generar perfiles de presión que representan el comportamiento hidráulico del sistema, permitiendo analizar la variación de las presiones a lo largo de la red y evaluar su desempeño bajo condiciones reales de operación como se muestra en la figura 2.2. El procedimiento de simulación incorpora la representación estructural de todos los componentes hidráulicos del sistema, incluyendo tuberías principales, secundarias y laterales, así como válvulas, nodos de consumo, hidrantes y emisores (Fig. 2.3). Cada elemento es caracterizado mediante parámetros hidráulicos específicos relacionados con diámetro, longitud, rugosidad, elevación topográfica y demanda de caudal, permitiendo obtener una representación precisa del comportamiento operativo de la red.

Se identifican las condiciones críticas de funcionamiento, especialmente en los puntos más desfavorables de la

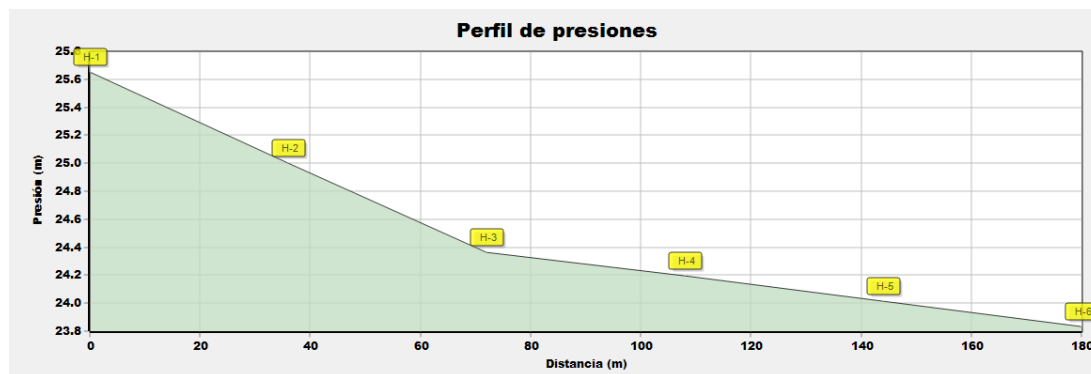


Figure 2.2. Perfil de presiones, EPANET.

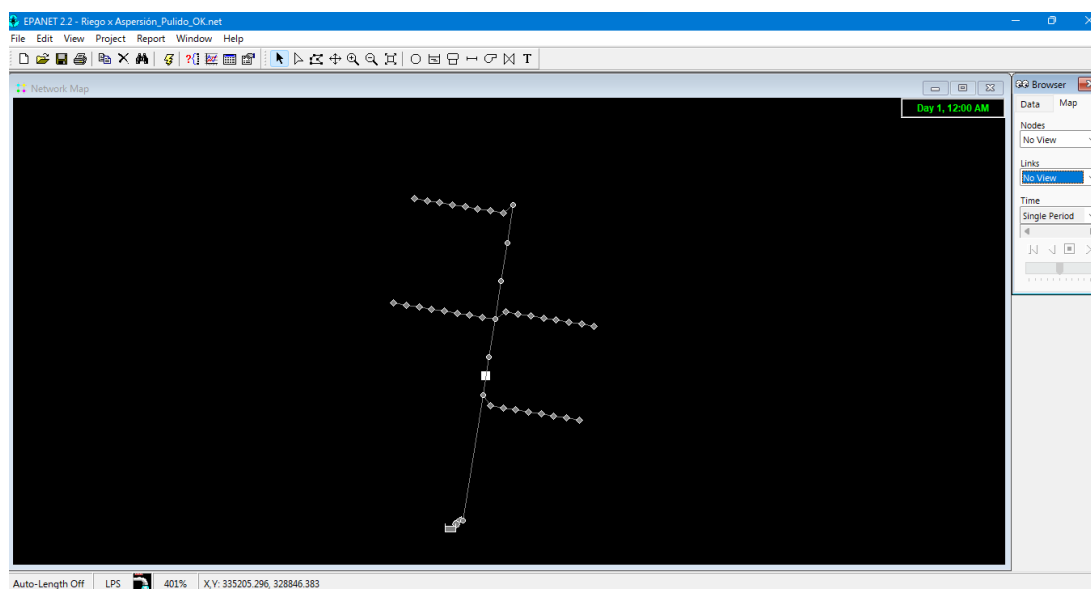


Figure 2.3. Representación estructural de todos los componentes hidráulicos del sistema de riego en EPANET.

instalación, donde pueden presentarse reducciones significativas de presión o variaciones de caudal que afecten la uniformidad del riego. En particular, se analizan los laterales extremos de la red, debido a que suelen presentar las mayores pérdidas de carga y las condiciones hidráulicas más restrictivas.

La modelación facilita la evaluación de la estabilidad hidráulica del sistema frente a distintos escenarios operacionales, permitiendo verificar el comportamiento de la red durante variaciones de demanda, cambios en simultaneidad de operación o modificaciones en las condiciones de suministro de agua. Este análisis resulta fundamental para garantizar un funcionamiento continuo, estable y energéticamente eficiente.

La metodología incorpora además procesos iterativos de optimización hidráulica, en los cuales se ajustan diámetros de tuberías, configuraciones de conducción y condiciones de operación hasta alcanzar valores adecuados de presión y velocidad dentro de toda la red. Estas simulaciones permiten reducir pérdidas energéticas, optimizar el consumo de potencia del sistema de bombeo y mejorar la uniformidad de distribución del agua en los emisores.

2.6. Dimensionamiento del sistema de bombeo

La siguiente etapa metodológica corresponde al dimensionamiento del sistema de bombeo, encargado de suministrar la energía hidráulica necesaria para garantizar el funcionamiento adecuado de la red de riego presurizada. Esta fase constituye el vínculo entre el diseño hidráulico y el sistema energético, debido a que define las condiciones de operación requeridas para transportar el agua desde la fuente de abastecimiento hasta los emisores con la presión y caudal adecuados.

Para la selección del equipo de bombeo se consideran parámetros hidráulicos como el caudal de diseño del sistema, la altura manométrica total, las pérdidas de carga por fricción y las diferencias de elevación presentes en la red. Estos elementos permiten determinar las condiciones reales de operación a las que estará sometido el equipo durante el funcionamiento del sistema de riego.

La altura manométrica total se determina a partir de la suma de las cargas estáticas y dinámicas presentes en la instalación, incorporando las pérdidas hidráulicas generadas en tuberías, accesorios, válvulas y emisores. Este parámetro constituye uno de los criterios principales para la selección de la bomba, ya que define la energía necesaria para garantizar el suministro uniforme de agua en toda la red hidráulica.

La metodología incorpora el análisis de las curvas características de funcionamiento de las bombas, permitiendo identificar el punto óptimo de operación mediante la intersección entre la curva del sistema y la curva característica del equipo. Este análisis resulta esencial para garantizar condiciones de trabajo estables, evitar sobrecargas hidráulicas y maximizar el rendimiento energético de la instalación (Fig. 2.4).

Durante el proceso de selección de la bomba se consideran criterios asociados a eficiencia hidráulica, estabilidad operacional y compatibilidad entre las condiciones hidráulicas del sistema y las prestaciones técnicas del equipo de bombeo. Asimismo, se evalúan aspectos relacionados con la continuidad operativa, confiabilidad mecánica y capacidad de adaptación frente a variaciones de caudal o presión durante el funcionamiento del sistema.

El dimensionamiento contempla además la estimación de la potencia requerida por el sistema de bombeo, parámetro fundamental para el posterior diseño del sistema fotovoltaico. Para ello se consideran tanto las condiciones nominales de operación como las pérdidas energéticas asociadas al transporte de agua y al rendimiento del equipo hidráulico. Este procedimiento permite establecer la demanda energética real del sistema y garantizar compatibilidad entre la bomba y la capacidad de generación fotovoltaica.

Se incorporan criterios orientados a la reducción del consumo energético y al incremento de la eficiencia global del sistema. Entre ellos se incluyen la optimización de diámetros hidráulicos, la disminución de pérdidas de carga y la selección de bombas con elevados rendimientos hidráulicos, contribuyendo a reducir costos operacionales y mejorar la sostenibilidad técnica del sistema de riego.

2.7. Diseño energético del sistema fotovoltaico

En esta etapa se dimensiona el sistema fotovoltaico destinado a suministrar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del sistema de bombeo del riego presurizado. Tiene como objetivo garantizar compatibilidad entre la demanda energética del sistema hidráulico y la capacidad de generación solar disponible, asegurando continuidad operativa, estabilidad energética y eficiencia global de la instalación.

Inicialmente se determina la demanda energética requerida para el funcionamiento del sistema hidráulico, con-

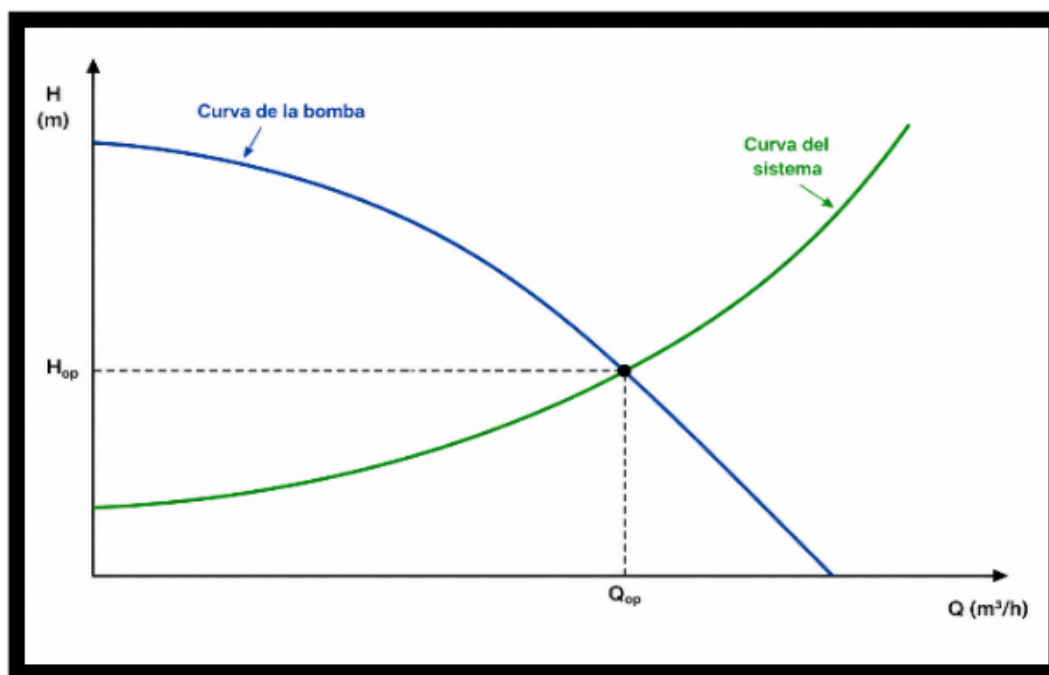


Figure 2.4. Curva característica de funcionamiento de la bomba.

siderando la potencia nominal del equipo de bombeo y el tiempo diario de operación establecido para el sistema de riego. Esta estimación constituye la base para el dimensionamiento energético del sistema fotovoltaico y permite cuantificar el consumo eléctrico asociado al transporte y distribución del agua. La energía demandada se calcula mediante la ecuación (2.4):

$$E_d = P_b \cdot t \quad (2.4)$$

Donde: E_d es la energía diaria (Wh/día); P_b es la potencia de la bomba (W); y t es el tiempo de funcionamiento diario (horas).

Se incorporan factores asociados a pérdidas eléctricas y eficiencia de conversión energética, considerando el rendimiento de inversores, conductores eléctricos, conexiones y demás componentes del sistema fotovoltaico. Se analizan condiciones ambientales variables como temperatura de operación, radiación solar incidente y posibles pérdidas por sombreado, aspectos que influyen directamente en el desempeño energético del sistema.

La potencia requerida del generador fotovoltaico se determina en función de la demanda energética calculada y de la disponibilidad de recurso solar en el área de instalación, expresada generalmente mediante las horas solares pico (HSP). Esta relación permite establecer la capacidad mínima de generación necesaria para garantizar el abastecimiento energético del sistema de bombeo, se muestra en la ecuación (2.5):

$$P_{PV} = \frac{E_d}{HSP} \quad (2.5)$$

Donde: P_{PV} representa la potencia pico del generador (Wp); E_d es la energía diaria (Wh/día); y HSP son las horas solares pico (h/día).

El análisis del recurso solar se desarrolla mediante registros meteorológicos y bases de datos de radiación solar, permitiendo evaluar la variabilidad temporal de la irradiancia y estimar el potencial energético disponible. Para ello se consideran curvas de radiación diaria, perfiles horarios de generación y comportamiento estacional de la energía solar incidente, parámetros fundamentales para garantizar estabilidad en el suministro eléctrico.

Durante esta etapa se seleccionan y configuran los principales componentes del sistema fotovoltaico, incluyendo

módulos solares, inversores, estructuras de soporte, conductores eléctricos, dispositivos de protección y sistemas de conexión. Esto se efectúa considerando criterios de eficiencia energética, compatibilidad eléctrica y confiabilidad operacional. En la figura 2.5 se representan todos los componentes principales de un sistema fotovoltaico y su relación entre ellos.

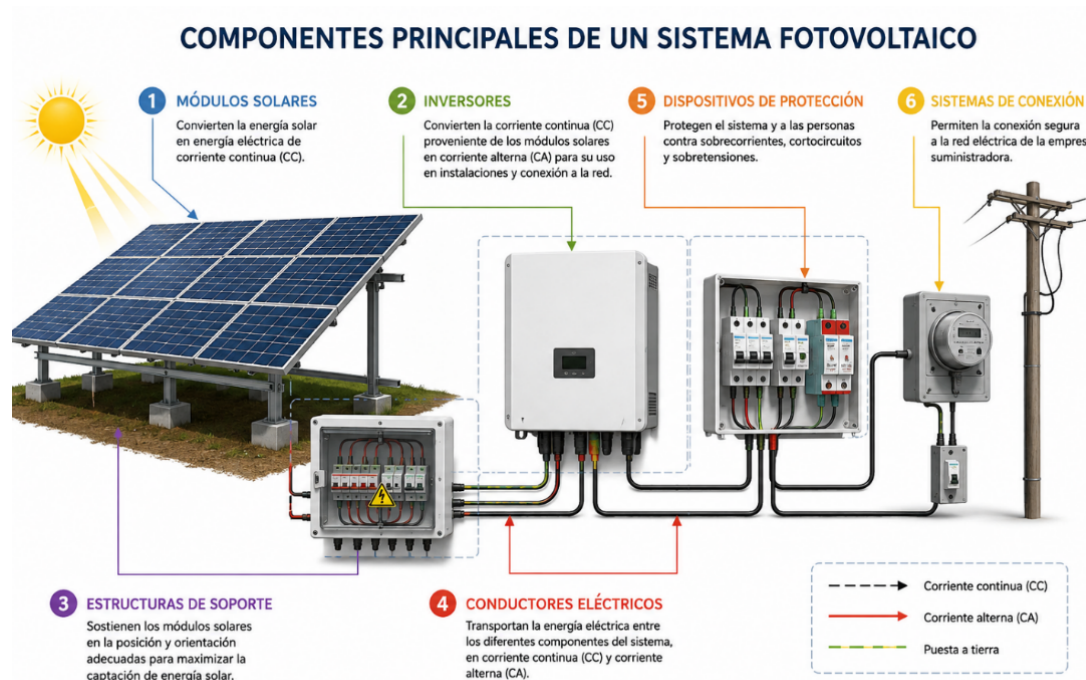


Figure 2.5. Componentes principales de un sistema fotovoltaico.

También se implementan criterios técnicos relacionados con orientación, inclinación y disposición geométrica del campo fotovoltaico, orientados a maximizar la captación de radiación solar y optimizar el rendimiento global del sistema. La configuración espacial de los paneles se analiza con el propósito de reducir pérdidas por sombreado, mejorar la ventilación natural de los módulos y mantener condiciones adecuadas de generación energética durante la operación del sistema.

La integración entre el sistema hidráulico y el sistema fotovoltaico constituye uno de los aspectos centrales de la metodología propuesta, debido a que el comportamiento energético del bombeo depende directamente de la disponibilidad de generación solar. Por esta razón, se evalúa la compatibilidad entre la demanda hidráulica, la capacidad de generación fotovoltaica y las condiciones reales de operación, garantizando un funcionamiento estable y energéticamente sostenible del sistema de riego.

2.8. Evaluación integral del sistema

La última etapa metodológica corresponde a la evaluación técnica, hidráulica y energética del sistema diseñado, fase en la cual se realiza el análisis integral del comportamiento operacional de la instalación con el propósito de verificar el cumplimiento de los criterios de diseño establecidos durante el desarrollo metodológico. Esta etapa permite validar la viabilidad técnica del sistema de riego fotovoltaico y comprobar la compatibilidad funcional entre los componentes hidráulicos y energéticos que conforman la instalación.

La evaluación hidráulica considera parámetros asociados al desempeño de la red de distribución, incluyendo presiones de operación, caudales de suministro, pérdidas de carga, velocidades de circulación y uniformidad de aplicación del agua en los emisores. Estos indicadores permiten determinar el grado de estabilidad hidráulica del sistema y verificar que las condiciones de operación se mantengan dentro de los rangos admisibles establecidos en el diseño.

Se analiza la eficiencia de distribución del agua mediante indicadores de uniformidad hidráulica y eficiencia de aplicación, los cuales permiten evaluar la capacidad del sistema para suministrar el recurso hídrico de manera homogénea en toda el área irrigada. Esto resulta fundamental para evitar déficits localizados de humedad, reducir pérdidas por escorrentía o infiltración profunda y optimizar el aprovechamiento del agua disponible.

La evaluación energética incorpora el análisis del comportamiento del sistema de bombeo y del generador fotovoltaico bajo condiciones reales de operación. Para ello se consideran variables relacionadas con demanda energética, eficiencia de conversión, rendimiento del bombeo y capacidad de generación solar. Este procedimiento permite verificar la compatibilidad entre la energía requerida por el sistema hidráulico y la energía suministrada por el sistema fotovoltaico.

Durante esta fase también se evalúa el comportamiento operativo del sistema fotovoltaico frente a variaciones de radiación solar y condiciones ambientales, verificando estabilidad en la generación eléctrica y continuidad en el funcionamiento del sistema de riego. Asimismo, se analizan pérdidas energéticas asociadas a inversores, conductores eléctricos y demás componentes de la instalación, permitiendo identificar posibles limitaciones operativas y oportunidades de optimización energética.

La integración de herramientas de simulación hidráulica y análisis energético permite validar técnicamente el funcionamiento global del sistema antes de su implementación física. Mediante estas simulaciones se verifican escenarios de operación variables, comportamiento de presiones en condiciones críticas y respuesta energética del sistema frente a diferentes demandas hidráulicas.

Adicionalmente, la metodología contempla la evaluación de beneficios asociados al empleo de energía solar como fuente de alimentación del sistema de bombeo, considerando aspectos relacionados con reducción del consumo de energía convencional, disminución de costos operacionales y mitigación del impacto ambiental derivado del uso de combustibles fósiles. Estos criterios permiten valorar el aporte del sistema fotovoltaico desde una perspectiva de sostenibilidad energética y ambiental.

03 DISCUSIÓN DE LA METODOLOGÍA

La aplicación de la metodología permite estructurar de manera coherente el proceso de diseño del sistema de riego, evidenciando una integración efectiva entre los componentes agronómicos, hidráulicos y energéticos. La organización por etapas facilita la transición entre fases, asegurando que cada decisión técnica estuviera fundamentada en información previamente definida.

Se observa una relación directa entre el diseño agronómico y el diseño hidráulico, donde la determinación de la demanda hídrica condiciona la configuración de la red de distribución. Esta dependencia funcional permite evitar inconsistencias en el dimensionamiento del sistema, contribuyendo a una mayor eficiencia en la distribución del agua.

La incorporación del sistema energético dentro del proceso metodológico permite establecer un vínculo claro entre la demanda hidráulica y la capacidad de generación fotovoltaica. Esta integración favorece el equilibrio entre consumo y suministro energético, lo que resulta esencial en sistemas autónomos.

Asimismo, el uso de herramientas de modelación y simulación permite evaluar el comportamiento del sistema antes de su implementación, reduciendo la incertidumbre y facilitando la identificación de posibles mejoras en el diseño. Este enfoque introduce un componente preventivo que fortalece la confiabilidad del sistema.

La metodología demuestra ser adaptable a diferentes condiciones del entorno, ya que parte de una caracterización específica del área de estudio. Esto permite ajustar el diseño a variables locales, incrementando su aplicabilidad en distintos contextos agrícolas.

04 CONCLUSIONES

La metodología propuesta integra de manera coherente los componentes agronómicos, hidráulicos y energéticos requeridos para el diseño de sistemas de riego por aspersión alimentados mediante energía solar fotovoltaica.

La estructuración metodológica en etapas secuenciales permite desarrollar el diseño de forma organizada y

técnicamente articulada, garantizando continuidad lógica entre las diferentes fases del proceso.

La incorporación de herramientas de modelación hidráulica facilita la evaluación operacional de la red, permitiendo verificar parámetros fundamentales asociados al comportamiento hidráulico del sistema. Asimismo, el dimensionamiento integrado del sistema de bombeo y del sistema fotovoltaico garantiza compatibilidad entre la demanda hidráulica y la disponibilidad energética.

La metodología constituye una herramienta técnicamente aplicable para el desarrollo de sistemas de riego sostenibles, favoreciendo la eficiencia energética y la reducción del impacto ambiental en la producción agrícola.

05 REFERENCIAS

- Barrueto Guzmán, A., Barraza Vicencio, R., Ardila-Rey, J. A., Núñez Ahumada, E., González Araya, A., & Arancibia Moreno, G.** (2018). A cost-effective methodology for sizing solar pv systems for existing irrigation facilities in Chile. *Energies*, 11(7), 1853. <https://doi.org/10.3390/en11071853>
- Bawa, A.-R., Amponsah, W., & Quansah, D. A.** (2025). Design, simulation, and economic analysis of a solar photovoltaic-powered pumping system for drip irrigation of a 1-ha bean farm in a tropical climate. *Journal of Engineering*, 2025(1), 1662260. <https://doi.org/10.1155/je/1662260>
- Carrión, P., Montero, J., & Tarjuelo Martín-Benito, J. M.** (2001). Aplicación de la simulación al diseño de los sistemas de riego por aspersión: El modelo sirias. <https://hdl.handle.net/2099/4493>
- Cauteruccio, A., & Lanza, L. G.** (2023). The long-term performance of a rainwater harvesting system based on a quasi-bicentennial rainfall time series. *Sustainability*, 15(21), 15619. <https://doi.org/10.3390/su152115619>
- Gevorkov, L., Domínguez-García, J. L., & Romero, L. T.** (2023). Review on solar photovoltaic-powered pumping systems. *Energies*, 16(1), 94. <https://doi.org/10.3390/en16010094>
- Gutierrez, J., Merino, G., Lara, D., & Salazar, L.** (2021). Hydraulic assessment of a photovoltaic system driving a conventional ac surface electric pump. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101060. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101060>
- Habib, S., Liu, H., Tamoor, M., Zaka, M. A., Jia, Y., Hussien, A. G., Zawbaa, H. M., & Kamel, S.** (2023). Technical modelling of solar photovoltaic water pumping system and evaluation of system performance and their socio-economic impact. *Heliyon*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16105>
- Hassan, O. H., Elhadidy, M. S., Elgohr, A. T., Ali, A. O., El-Mahdy, M. H., & Zaki, M.** (2024). Performance evaluation of a standalone solar-powered irrigation system in desert regions using pvsyst: A comprehensive analysis. *2024 25th International Middle East Power System Conference (MEPCON)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/MEPCON63025.2024.10850121>
- Martín-Benito, J. M. T.** (1991). *El riego por aspersión*. Universidad de Castilla-La Mancha.
- Mérida García, A., Fernández García, I., Camacho Poyato, E., Montesinos Barrios, P., & Rodríguez Díaz, J. A.** (2018). Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system. *Journal of Cleaner Production*, 175, 670–682. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.093>
- Mesele, H., Grum, B., Aregay, G., & Berhe, G. T.** (2024). Evaluation and comparison of infiltration models for estimating infiltration capacity of different textures of irrigated soils. *Environmental Systems Research*, 13(1), 26. <https://doi.org/10.1186/s40068-024-00356-5>
- Navarro-González, F. J., Pardo, M. Á., Chabour, H. E., & Alskaf, T.** (2023). An irrigation scheduling algorithm for sustainable energy consumption in pressurised irrigation networks supplied by photovoltaic modules. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(6), 2009–2024. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02486-3>
- Rossman, L. A.** (2001). *Epanet 2 manual del usuario*.
- Vishwakarma, D. K., Yadav, D., Kumar, R., Kumar, R., Bhat, S. A., Mirzania, E., & Kuriqi, A.** (2025). Assessing the performance of various infiltration models to improve water management practices. *Paddy and Water Environment*, 23(1), 77–93. <https://doi.org/10.1007/s10333-024-01000-9>

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

ORCID de los autores

Samantha Lazara Cáceres Fuente <https://orcid.org/0009-0008-8432-4761>

Daniela Córdova de Horta <https://orcid.org/0000-0002-7284-9682>