



Sistemas de agua mediante energía solar

Documento guía para el
diseño y la instalación



unicef



water
mission®



INTRODUCCIÓN



A. INTRODUCCIÓN

1. General

1.1. Alcance

Este documento proporciona instrucciones detalladas de todos los temas técnicos relacionados al diseño e instalación de sistemas de agua mediante energía solar en el contexto rural de suministro de agua. La motivación para este documento es proporcionar una guía basada en estándares técnicos reconocidos internacionalmente y proporcionar instrucciones para cumplir con dichos estándares.

La base técnica para este documento guía es la norma internacional 62253 de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, por sus siglas en inglés) de Sistemas de bombeo fotovoltaico: calificación del diseño y medidas de rendimiento. El propósito de este documento es mostrar al lector cómo cumplir con los requisitos de estas normas IEC. Las normas IEC adicionales que son relevantes para este documento guía se enumeran en **2.1. Conformidad del sistema hidráulico**.

Este documento no aborda todos los temas relacionados con las mejores prácticas de desarrollo de aguas subterráneas y de pozos de agua perforados (pozo de perforación), ya que otros han tratado previamente estos temas a fondo (UNICEF/Fundación Skat, 2016 y UNICEF/Skat, 2018).

Este documento asume que la energía hacia la bomba y al motor es proporcionada únicamente mediante un sistema de energía solar. Este documento no incluye fuentes de energía secundarias (red de CA o generador) ni almacenamiento de energía (batería).

1.2. Autor

Este documento guía fue escrito por Water Mission – Departamento de Ingeniería e Innovación, Charleston, Carolina del Sur, EE. UU. (watermission.org), como parte de un acuerdo de cooperación de programa con la División de Programas de la Sede de ASH de UNICEF y ha sido revisado y consensuado por el equipo de la Sede Central, la División de Suministros, asesores Regionales y equipos de ASH en distintos países.

Esta publicación puede ser reproducida en su totalidad o en parte y en cualquier formato para propósitos educativos o sin fines de lucro sin permiso especial de UNICEF y Water Mission siempre que se realice un reconocimiento adecuado de la fuente. UNICEF y Water Mission apreciarían recibir una copia de cualquier publicación que use esta publicación como fuente. No se puede utilizar esta publicación para reventa o para ningún otro propósito comercial sin el permiso previo por escrito de UNICEF y Water Mission. Esta publicación es una guía y la información proporcionada en la misma debe usarse como un lineamiento y sin ninguna garantía de exactitud o completitud. Cualquier uso del contenido proporcionado en la misma es bajo su propia responsabilidad. La designación de entidades geográficas en este reporte y la presentación del material no implica la expresión de ninguna opinión de parte del editor o las organizaciones participantes con respecto al estatus legal del país, territorio o área o sus autoridades o con respecto a la delimitación de sus fronteras o límites.

Se agradece en especial a las siguientes organizaciones por revisar y proporcionar información valiosa sobre el contenido de este documento: Iniciativa Global de Agua Solar, Organización Mundial para la Migración, Oxfam, Fundación Practica, Universidad de Texas en Austin.

Las versiones traducidas al español y al francés de este documento guía fueron posibles gracias a la generosidad y al apoyo del Centro Global del Agua y la Iniciativa Global de Agua Solar.

Materiales e instrucciones adicionales estarán disponibles, incluyendo documentos y guías ejemplo de Términos de Referencia, ejemplos y guías de listados de partidas, ejemplos de diseño avanzado y estudio de casos de diversas regiones del mundo. A medida que estos materiales estén disponibles, serán accesibles a través de canales similares donde esta Guía se encuentra disponible.

1.3. Índice

A. INTRODUCCIÓN

1.	General	3
1.1.	Alcance	3
1.2.	Autor	3
1.3.	Índice	4
1.4.	Definiciones	7

B. DISEÑO

2.	Criterio de diseño	11
2.1.	Conformidad del sistema de agua.	11
2.2.	Demanda diaria de agua del proyecto	13
2.2.1.	Población del área de servicio	13
2.2.1.1.	Tipos de población: hogares	14
2.2.2.	Otros usos diarios del agua	14
2.2.3.	Área de uso de agua de servicio	16
2.2.4.	Predicción de la demanda de los individuos	19
2.2.4.1.	Demanda máxima en la puesta en servicio del sistema	20
2.2.4.2.	Demanda prevista en la puesta en servicio del sistema	20
2.2.4.3.	Demanda futura prevista	20
2.2.5.	Pérdidas de agua del sistema	21
2.2.6.	Demanda del diseño	21
2.3.	Fuente de agua	25
2.3.1.	Rendimiento de la fuente	25
2.3.1.1.	Rendimiento de la fuente de agua de un pozo	25
2.3.1.1.1.	Comprendiendo el descenso de nivel.	27
2.3.1.1.2.	Prueba de rendimiento máximo de los pozos	28
2.3.1.1.2.1.	Descripción	28
2.3.1.1.2.2.	Procedimiento de la prueba	28
2.3.1.1.3.	Opciones de prueba de rendimiento de pozo	32
2.3.1.2.	Rendimiento de la fuente de agua de una fuente superficial	32
2.3.1.3.	Rendimiento seguro o rendimiento permitido	33
2.3.2.	Condiciones de la fuente	33
2.3.2.1.	Condiciones del pozo	33
2.3.2.2.	Elevación de la fuente de agua	33
2.3.2.3.	Calidad del agua	33
2.3.2.4.	Condiciones geográficas	35
2.4.	Disposición del diseño del sistema de suministro de agua	35
2.5.	Ubicación del proyecto	36
2.5.1.	Horas de luz diurna y datos de irradiancia para la ubicación del proyecto	36
2.5.2.	Datos de temperatura e irradiancia para la ubicación del proyecto	37
2.5.3.	Datos mensuales de temperatura e irradiancia	38
3.	Selección de bomba y motor (o selección del conjunto de bomba fotovoltaica)	39
3.1.	Flujo de diseño	39
3.1.1.	Suplemento de energía	40
3.2.	Selección de bomba y motor (o selección del conjunto de bomba fotovoltaica)	40
3.2.1.	Tipos de bombas según la fuente de agua	40
3.2.1.1.	Fuente de agua subterránea	40

3.2.1.2.	Fuente de agua superficial	41
3.2.2.	Curvas de bomba	41
3.2.2.1.	Selección de una bomba de CA utilizando curvas de bomba tradicionales	41
3.2.2.2.	Selección de una bomba utilizando las curvas de rendimiento de la bomba solar	42
3.2.2.3.	Software de selección de fabricante	44
3.3.	Energía requerida	44
3.3.1.	Energía requerida por el motor de la bomba	44
3.3.2.	Energía requerida por el inversor	44
3.4.	Especificaciones del fabricante	44
3.4.1.	Con respecto al motor	44
3.4.2.	Con respecto al inversor	44
3.5.	Equipo auxiliar de bomba y motor	44
3.5.1.	Unidades de control	46
3.5.2.	Inversores	46
3.5.3.	Interruptores de flotador	46
3.5.4.	Sensores/interruptores de funcionamiento en seco	47
3.6.	Diseño de instalación de bomba y motor	47
4.	Diseño de sistema FV	47
4.1.	Diseño de instalación solar	47
4.1.1.	Selección de panel solar	49
4.1.1.1.	Cálculo del rendimiento estimado de un panel según la ubicación del proyecto	50
4.1.2.	Configuración de una instalación solar	51
4.1.3.	Pérdidas de energía	52
4.1.4.	Verificación de vataje suministrado	54
4.1.5.	Verificación de voltaje y amperaje suministrados	55
4.2.	Requerimientos adicionales de instalación	55
4.2.1.	Ángulo de inclinación de la instalación solar	55
4.2.2.	Dirección cardinal de la instalación solar	55
4.3.	Requerimientos de cableado eléctrico	57
4.3.1.	De paneles solares a la bomba	57
4.3.2.	Puesta a tierra (o conexión a tierra)	58
4.4.	Identificar los componentes complementarios de la instalación solar	58
4.4.1.	Interruptor de desconexión (o disyuntor)	58
4.4.2.	Caja de conexiones	58
4.5.	Diseño de bastidor de instalación solar	58
4.5.1.	Diseño de bastidores estructurales	59
4.5.2.	Otras consideraciones del diseño de bastidores	59
4.5.3.	Seguridad de los paneles solares	60
4.6.	Ubicación de la instalación solar	60
4.7.	Mantenimiento de la instalación solar	60
4.8.	Verificación del diseño del sistema con respecto a la demanda diaria de agua del proyecto	61
5.	Almacenamiento de agua	75
5.1.	Consideraciones del almacenamiento de agua	75
5.2.	Volumen del tanque de almacenamiento de agua	75
5.3.	Diseño de soporte del tanque	77
6.	Documentación del diseño	77

C. INSTALACIÓN

7.	Seguridad de la instalación y la construcción	79
7.1.	Seguridad eléctrica	79

7.2.	Seguridad del trabajo en alturas	79
8.	Supervisión e inspección	79
9.	Instalación del sistema de agua.....	80
9.1.	Todos los componentes del sistema	80
9.2.	Tuberías.....	81
10.	Instalación de la bomba y el motor.....	81
10.1.	Instalación de la bomba y el motor.....	81
10.2.	Instalación de la bomba	81
10.2.1.	Fuente de agua	81
10.2.1.1.	Rendimiento de la fuente.....	82
10.2.1.2.	Protección de la fuente.....	82
10.2.2.	Requerimientos de instalación de bomba y motor.....	82
10.3.	Instalación del equipo auxiliar de bomba y motor	82
10.4.	Cableado de los equipos de motor y bomba auxiliares	83
11.	Instalación y construcción de sistemas FV	85
11.1.	Panel solar	85
11.2.	Instalación solar	85
11.3.	Cableado de la instalación solar	85
11.4.	Componentes suplementarios de la instalación solar	86
11.5.	Bastidor de instalación solar	86
12.	Construcción del almacenamiento de agua.....	87
12.1.	Instalación del tanque de almacenamiento.....	87
12.2.	Construcción de la estructura de soporte del tanque	87

D. PUESTA EN MARCHA

13.	Prueba del sistema	89
13.1.	Prueba del sistema FV.....	89
14.	Documentación	89
15.	Información de reemplazo de equipos o repuestos	90

E. TEMAS SUPLEMENTARIOS

16.	Introducción a la operación y mantenimiento de sistemas de agua mediante energía solar	90
17.	Sistemas de agua mediante energía solar en respuesta a desastres humanitarios	91

F.	REFERENCIAS	92
G.	OTROS RECURSOS DEL SISTEMA DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA SOLAR. .	93
H.	ANEXOS.....	95
a.	Anexo A. Pasos básicos para diseñar un sistema de agua mediante energía solar	95
b.	Anexo B. Ejemplo: Calcular la demanda diaria de agua del proyecto	96
c.	Anexo C. Ejemplo: Realizar una prueba de rendimiento máximo	99
d.	Anexo D. Ejemplo: Selección de una bomba solar	108
e.	Anexo E. Ejemplo: Diseño del sistema FV para una bomba solar	109
f.	Anexo F. Ejemplo: Selección de una bomba de CA	114
g.	Anexo G. Ejemplo: Diseñar el sistema FV para una bomba de CA con inversor.....	114
h.	Anexo H. Potencia hidráulica, potencia de frenado y potencia del motor. . .	120



Foto cortesía de Water Mission

1.4. Definiciones

Ingeniero responsable: La persona o entidad (en una empresa de ingeniería) responsable de la parte del diseño, quien asume la responsabilidad formal mediante firma, sello o timbre profesional y/u otros medios legalmente reconocidos. Al ingeniero responsable también se le puede denominar ingeniero de diseño o ingeniero consultor.

IEC: Comisión Electrotécnica Internacional.

Irradiancia incidente: La irradiancia sobre una superficie, ya sea inclinada o plana, que variará según el ángulo de inclinación de la superficie.

Inversor: Dispositivo que convierte la electricidad de corriente continua (CC) en electricidad de corriente alterna (CA). El dispositivo también se puede denominar convertidor fotovoltaico.

Irradiación: La suma de las irradiancias incidentes en un lugar determinado de tierra durante el transcurso de un día solar (expresada en unidades de kWh/m²/día).

NEC: Código Eléctrico Nacional (Estados Unidos).

NOCT: Temperatura de operación nominal de la célula, medida con una irradiancia de 800 W/m² y una temperatura ambiente de 20 °C.

Sistema fotovoltaico (FV): Los sistemas fotovoltaicos convierten la irradiancia (energía solar) del sol en electricidad.

Conjunto de bomba fotovoltaica: Esta terminología es otra forma de referirse a una combinación de bomba y motor.

Instalación solar (o instalación fotovoltaica): Una configuración de paneles solares dispuestos y conectados entre sí para generar energía como una sola unidad.

Sistema de estantería de instalación solar: Sistema estructural diseñado y construido para soportar la instalación solar según las condiciones de diseño.

Irradiancia solar: La potencia por unidad de área que recibe el sol (el sol emite un promedio de 1,367 julios por segundo por metro cuadrado de superficie y, de esta, un máximo de aproximadamente 1,000 vatios por metro cuadrado (W/m²) llega a la superficie terrestre).

Paneles solares: Los paneles solares utilizan la luz solar (o energía luminosa del sol) para producir electricidad. Los paneles solares también pueden denominarse módulos o generadores fotovoltaicos (o módulos o generadores FV) o una combinación de esos términos (tales como paneles solares FV o paneles solares fotovoltaicos).

Bomba solar: Este término generalmente hace referencia a bombas que tienen un controlador, motor y bomba integrados en una sola unidad que puede aceptar una entrada de energía de CC. Esto no es exclusivamente cierto, ya que algunas unidades denominadas “bombas solares” no tienen controles de bomba integrados. También se debe reconocer que estas bombas pueden tomar cualquier tipo de entrada de energía de CC y no exclusivamente solar.

STC: Condiciones de prueba estándar, definidas como una temperatura de célula de 25 °C, una irradiancia de 1000 W/m² y un coeficiente de masa de aire de 1.5 (AM1.5), (referencia IEC 61215).

Ángulo de inclinación: El ángulo de inclinación de los paneles solares con respecto a la horizontal.

CDT: La carga dinámica total es el levantamiento de elevación total (incluida la pérdida por fricción) que se requiere de la bomba en el sistema de suministro de agua. La bomba logra esto al aplicar presión (o energía por unidad de volumen) en el agua del sistema.

SISTEMA DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA SOLAR

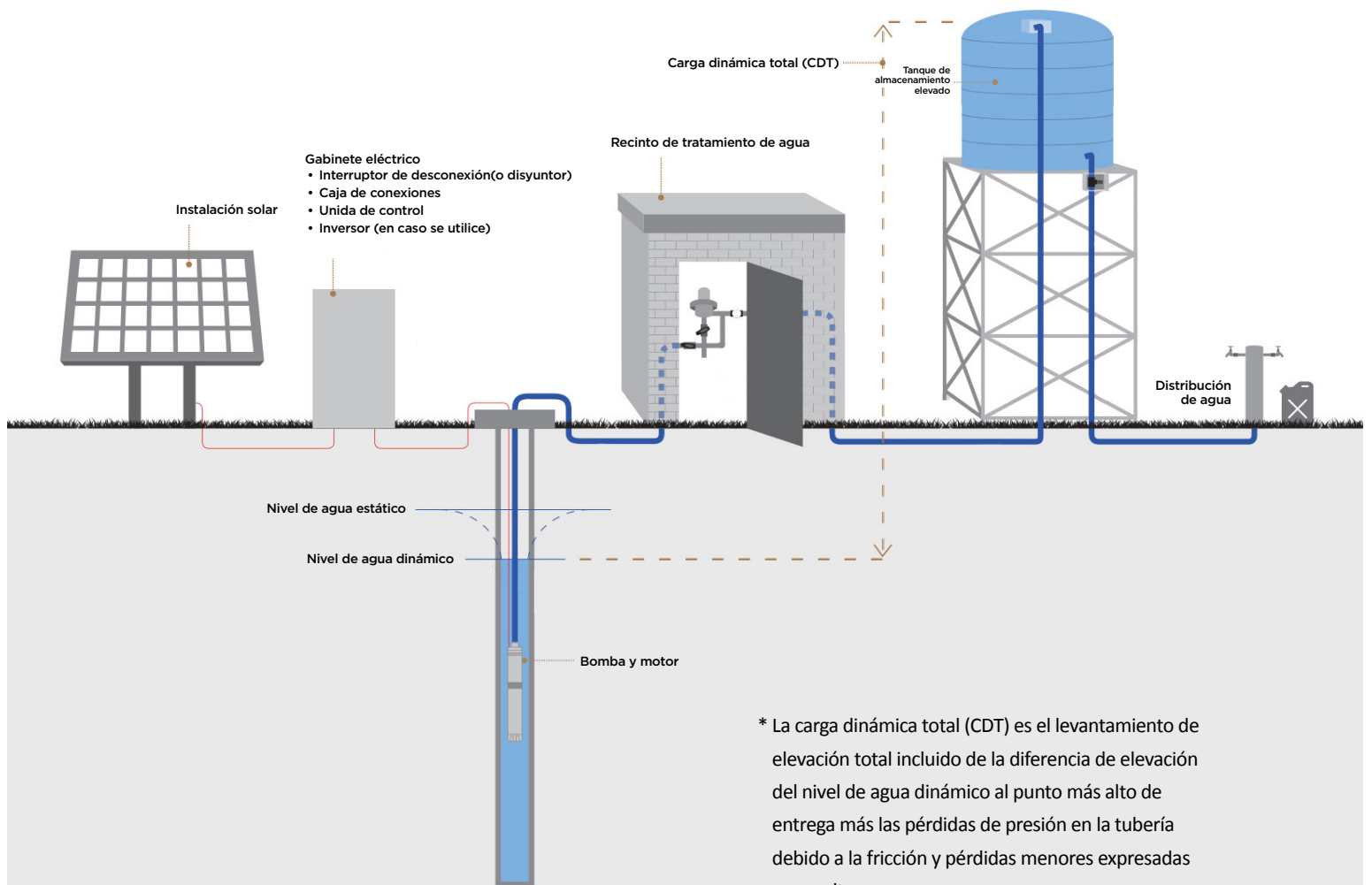


Figure 1.4. – Sistema de agua mediante energía solar

PASOS BÁSICOS PARA DISEÑAR UN SISTEMA DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA SOLAR

Hay cinco pasos básicos involucrados en el diseño de un sistema de agua mediante energía solar.

Paso 1: Calcular la demanda diaria de agua para el proyecto.

Referencia en el documento guía:	2.2. Demanda diaria de agua del proyecto
Pregunta a responder:	¿Cuál es la demanda de agua que el sistema de agua mediante energía solar está diseñado para producir?

Paso 2: Determinar el rendimiento de la fuente de agua disponible para el sistema de agua mediante energía solar.

Referencia en el documento guía:	2.3. Fuente de agua
Pregunta a responder:	¿El rendimiento de la fuente de agua cumple o excede la demanda calculada en el Paso 1?

Paso 3: Determine la carga dinámica total (CDT) del sistema de agua en el flujo de diseño elegido.

Referencia en el documento guía:	2.4. Disposición del diseño del sistema de suministro de agua 3.1. Flujo de diseño
Pregunta a responder:	¿Cuál es el flujo de diseño y la CDT que deberá cumplir la bomba?

Paso 4: Seleccionar una bomba y un motor.

Referencia en el documento guía:	3.2. Selección de bomba y motor (o selección del conjunto de bomba fotovoltaica) 3.3. Energía requerida 3.4. Especificaciones del fabricante
Pregunta a responder:	¿Cuáles son los requisitos de energía del motor de la bomba para lograr el rendimiento deseado de la bomba?

Paso 5: Diseñar el sistema FV.

Referencia en el documento guía:	4. Diseño de sistema FV
Pregunta a responder:	¿Cómo se debe configurar la instalación solar para suministrar la energía requerida por el motor de la bomba?

Como muestra este documento guía, cada sistema individual puede tener consideraciones específicas que deben tenerse en cuenta en los detalles del diseño del sistema. Sin embargo, estos cinco pasos constituyen los componentes principales de cada sistema y ningún diseño de sistema de agua mediante energía solar está completo sin ellos.



DISEÑO



B. DISEÑO

2. Criterio de diseño

2.1. Conformidad del sistema de agua

El diseño y la construcción de cualquier sistema de agua (independientemente de la fuente de energía del sistema) debe realizarse en total cumplimiento de todos los códigos, normas y regulaciones de las entidades gubernamentales que tengan jurisdicción exigible sobre la ubicación en la que se instalará el sistema de agua. Como tal, esta guía no se utilizará bajo ninguna circunstancia para eludir dicho código, norma o reglamento. Dado que esta guía abarca temas de diseño y construcción relacionados con los sistemas de agua mediante energía solar, debe tenerse en cuenta que la conformidad con las entidades gubernamentales locales irá más allá de temas relacionados únicamente con el agua y, por lo tanto, también incluirá códigos, normas y reglamentos eléctricos.

Todos los estándares internacionales relacionados con la energía fotovoltaica son aplicables a la guía de diseño de este documento. La Norma Internacional IEC 62253 es la base técnica de esta guía. Como se indicó anteriormente, este documento pretende mostrar al lector cómo cumplir con los requisitos de las normas IEC. Además de IEC 62253, las siguientes normas internacionales de IEC también tienen una relevancia específica:

- IEC 60364-7-712 Instalaciones eléctricas de edificios. Parte 7-712: Requisitos para instalaciones de emplazamientos especiales. Sistemas de suministro de energía solar fotovoltaica (FV).
- IEC 60947-1 Conmutador y mecanismo de distribución de baja tensión. Parte 1: Reglas generales.
- IEC 61215-1 Módulos fotovoltaicos (FV) para uso terrestre. Aprobación de tipo y requisito de diseño. Parte 1: Requisitos de ensayo.
- IEC 61215-1-1 Módulos fotovoltaicos (FV) para uso terrestre. Aprobación de tipo y requisito de diseño. Parte 1-1: Requisitos especiales de ensayo para los módulos fotovoltaicos (FV) de silicio cristalino.
- IEC 61215-1-2 Módulos fotovoltaicos (FV) para uso terrestre. Aprobación de tipo y requisito de diseño. Parte 1-2: Requisitos especiales de ensayo para los módulos fotovoltaicos (FV) de lámina delgada de telururo de cadmio (CdTe).
- IEC 61215-1-3 Módulos fotovoltaicos (FV) para uso


terrestre. Aprobación de tipo y requisito de diseño. Parte 1-3: Requisitos especiales de ensayo para los módulos fotovoltaicos (FV) de lámina delgada basados en silicio amorfo.

- IEC 61215-1-4 Módulos fotovoltaicos (FV) para uso terrestre. Aprobación de tipo y requisito de diseño. Parte 1-4: Requisitos especiales de ensayo para los módulos fotovoltaicos (FV) de lámina delgada de Cu (In, GA) (S, Se)₂.
- IEC 61215-2 Módulos fotovoltaicos (FV) para uso terrestre. Aprobación de tipo y requisito de diseño. Parte 2: Procedimientos de ensayo.
- IEC 61730-1 Calificación de la seguridad de módulo fotovoltaico (FV). Parte 1: Requisitos de construcción.
- IEC 61730-2 Calificación de la seguridad de módulo fotovoltaico (FV). Parte 2: Requisitos de ensayo.
- IEC 62109-1 Seguridad de los convertidores de potencia utilizados en sistemas de potencia fotovoltaicos. Parte 1: Requisitos generales.
- IEC 62109-2 Seguridad de los convertidores de potencia utilizados en sistemas de potencia fotovoltaicos. Parte 2: Requisitos particulares para inversores.
- IEC 62124 Verificación del diseño de sistemas fotovoltaicos (FV) autónomos.
- IEC 62548 Requisitos de diseño para instalaciones fotovoltaicas (FV).

Todas las normas IEC están disponibles para su compra en el sitio web de la Comisión Electrotécnica Internacional (<https://www.iec.ch/>).

Todos los procesos de permisos de la entidad gobernante deben seguirse de acuerdo con sus requisitos. Esto puede incluir permisos para el uso del agua, derechos/ adquisiciones de terrenos y permisos de construcción.

Asimismo, se recomienda encarecidamente que el diseñador y los instaladores del sistema de agua mediante energía solar involucren a los líderes de la comunidad local. Sin la participación de los líderes comunitarios en la planificación y ejecución de un proyecto de esta naturaleza, el proyecto enfrentará muchas fuentes de posibles fallas. Las fuentes de fallas podrían incluir el uso del terreno, el uso de agua, los métodos de suministro de agua deseados, la operación diaria planificada del sistema de agua, el cumplimiento planificado de los requisitos de mantenimiento rutinario y todos los acuerdos financieros relacionados.



Demanda diaria de agua del proyecto

El objetivo es determinar una demanda diaria de agua del proyecto indicada en volumen por unidad de tiempo, la cual luego informa la demanda del diseño (ver 2.2.6. Demanda del diseño).

La demanda del diseño proporciona la base para el resto del diseño del sistema de agua mediante energía solar.



2.2. Demanda diaria de agua del proyecto

(referencia IEC 62253 – 6.2. Datos del cliente, d. demanda de agua)

La base fundamental para el diseño de cualquier sistema de bombeo mecanizado es la demanda de agua de los eventuales usuarios del sistema de agua. Determinar cuánta agua necesita una comunidad es un proceso complicado, pero es un paso esencial en el diseño. Los componentes básicos del cálculo de la demanda de agua incluyen:

- calcular la población total y el consumo diario de agua de los individuos,
- determinar cualquier otro uso del agua que proporcionará el sistema de agua propuesto y
- evaluar las pérdidas de agua del sistema existente.

Una ecuación general para calcular la demanda es la siguiente:

Demanda diaria de agua del proyecto = Uso diario de agua por individuo × Población del área de servicio + Otros usos diarios del agua (instituciones, ganadería, comercial, industrial, recreativa, etc.) + Pérdidas de agua del sistema por día

Aunque esta ecuación parece un cálculo sencillo, la determinación de cada componente de la ecuación es compleja.

Hay muchos factores que influyen en el uso del agua de una comunidad. Esta sección aborda cada componente utilizado para determinar la demanda. **El objetivo es determinar la demanda de agua diaria del proyecto expresada en volumen por unidad de tiempo, la cual luego reportará la demanda del diseño (ver 2.2.6. Demanda del diseño).**

La demanda del diseño proporcionará la base para el resto del diseño del sistema de agua mediante energía solar. El ejemplo de las páginas 22 a 25 (y el Anexo b) demuestra el uso de esta ecuación.

Antes de continuar, también se debe tener en cuenta que la sección 6.2.d) de IEC 62253 indica que la demanda de agua es el “suministro de agua diario requerido bajo las peores condiciones definidas”. Luego, continúa enumerando la irradiancia, la fecha y la carga de agua (o CDT) como los elementos que influyen en las peores condiciones. Se continuará discutiendo sobre la implicación de la peor condición a lo largo de esta guía a medida que se analizan cada uno de estos temas. En la actualidad, es importante señalar que los diseñadores del proyecto deberán determinar las peores condiciones de cada proyecto individual y sus implicaciones. Asimismo, los diseñadores del proyecto deben tener el consenso de todas las partes involucradas en el proyecto antes de establecer una demanda de diseño y finalizar el diseño del proyecto.

2.2.1. Población del área de servicio

El primer paso para calcular la demanda de agua del sistema de agua propuesto es determinar el uso diario de agua por persona en el área de servicio del sistema. Para ello, primero se debe evaluar la población total que será atendida por el proyecto de agua. Este cálculo debe incluir las poblaciones tanto de los hogares de la comunidad como de las instituciones locales.

Las cifras de la población de una comunidad determinada pueden obtenerse de la autoridad de gobierno local, si esa autoridad mantiene estadísticas de población. Sin embargo, es mejor verificar las cifras por algún medio. Dado que la población afectará el cálculo de la demanda de agua y, posteriormente, el diseño del sistema de agua mediante energía solar, la cifra de la población utilizada en el diseño debe tener un alto grado de precisión. Asimismo, se deben aplicar factores de crecimiento poblacional apropiados a la población evaluada para considerar el potencial uso futuro del sistema (ver 2.2.4.3. **Demanda futura prevista**).

También se debe reconocer que hay comunidades rurales donde la población cambia a lo largo de las diferentes estaciones del año. Esto puede deberse a instituciones locales (por ejemplo, internados), las ocupaciones de las personas (por ejemplo, pastores, trabajadores itinerantes) u otras razones. Un cambio anual en la población afectará la demanda diaria de agua del proyecto y puede contribuir a un escenario que incluya las peores condiciones para el proyecto.

2.2.1.1. Tipos de población: hogares

El número de hogares y el número promedio de personas por hogar se determinan normalmente durante la fase de evaluación del proyecto. Como se indicó anteriormente, esta información también puede estar disponible a través de la autoridad de gobierno local o los líderes comunitarios. De manera independiente, el diseñador del proyecto puede obtener (o verificar) el número de hogares y el número promedio de personas por hogar. El método de verificación más fácil es contar primero el número de hogares al caminar o conducir por la comunidad y preguntar a los miembros de la comunidad cuántos miembros residen en cada hogar. Asimismo, el número de hogares se puede corroborar utilizando una imagen aérea de la comunidad de Google Earth.

La población aproximada basada en los hogares en la comunidad se puede estimar usando la siguiente ecuación:

$$\text{Población aproximada} = \text{Número de hogares} \times \text{Número promedio de personas por hogar}$$

Si los objetivos del proyecto requieren una cifra de población de los hogares más exacta, entonces se puede realizar una encuesta formal casa por casa. Esto implicará más tiempo e inversión, pero también tendrá un mayor grado de precisión.

2.2.2. Otros usos diarios del agua

Se deben considerar otros usos del agua del área de servicio antes de diseñar el sistema de agua. Otros usos por lo general incluyen:

- Uso por parte de instituciones como escuelas, clínicas y centros religiosos
- Uso para ganado y riego de cultivos
- Uso para actividades comerciales e industriales
- Cualquier uso recreativo

A continuación, se ofrecen más comentarios sobre las instituciones. Luego, todos los usos enumerados se presentan en **2.2.3. Área de uso de agua de servicio.**

Instituciones

Se debe considerar la presencia de instituciones en la comunidad. Se deben incluir tanto el número de personas a las que se atenderá, así como los requisitos de uso de agua de las instalaciones institucionales. La forma en que la demanda total de agua del proyecto representará la demanda de agua adicional de estas poblaciones debe estar claramente definida en la documentación de diseño del proyecto. Esto se puede lograr de dos maneras. Antes de discutir los dos métodos, es necesario reconocer que se deben seguir los requisitos de las entidades gubernamentales con respecto a la inclusión de las poblaciones institucionales.

El primer método requiere agregar una estimación de la población atendida por las instituciones locales a la población determinada por el número de hogares para calcular la población total atendida por el proyecto. Sin embargo, se debe utilizar el buen juicio al examinar el efecto que tendrán las instituciones sobre la demanda de agua. Por ejemplo, supongamos que una comunidad tiene una escuela que atiende a 500 niños. Si la mitad de los estudiantes son residentes de la comunidad, ya estarían contabilizados en la población determinada por el número de hogares. Los 250 estudiantes restantes que viajan al pueblo específicamente para ir a la escuela agregarían demanda al sistema de agua. Por lo tanto, estos 250 estudiantes podrían sumarse a la población de los hogares (ver **2.2.1.1. Tipos de población: hogares**).

El segundo método implica determinar (o estimar) la cantidad de agua que utiliza regularmente la institución, independientemente de la población de la institución. Por ejemplo, si una clínica médica tiene suficientes camas de hospital para acomodar a 25 pacientes a la vez, entonces la clínica necesitará acceso al agua para 25 pacientes (independientemente de si los pacientes están usando siempre las 25 camas). En este escenario, la cantidad de agua que la clínica necesita diariamente se puede calcular utilizando un índice de uso de agua por cama de paciente. En este método, la población institucional no se agregaría a la población estimada por hogar. Por el contrario, esta sería una segunda demanda de uso a incluir en el cálculo de la demanda de agua diaria total. Esta demanda de agua diaria institucional se sumaría a la demanda de agua diaria de los hogares.



Tipos de población:

Hogares e instituciones



Fotos cortesía de Water Mission

2.2.3. Área de uso de agua de servicio

Una vez que se ha determinado la población total del área de servicio, el siguiente paso es estimar el uso individual de agua. Como se mencionó anteriormente, también se debe contabilizar cualquier uso institucional de agua. Además, es importante considerar cualquier otro uso que no se tenga en cuenta en los cálculos de los hogares o institucionales, tales como ganadería, riego, actividades comerciales e industriales y uso recreativo.

En el campo del desarrollo internacional, se ha debatido mucho sobre la cantidad de agua que se debe proporcionar a los individuos y otros usuarios (instituciones, riego, etc.) por día. La demanda individual incluye muchas consideraciones, tales como el consumo, la higiene, la cocina y otros usos. De manera ideal, el proyecto podrá satisfacer todos estos usos (pero hacerlo puede no ser práctico). A continuación, se brindarán las pautas de varias agencias para determinar la cantidad de agua que se proporciona a los individuos y otros usuarios. Estas pautas pueden resultar útiles cuando exista incertidumbre con respecto al uso real. Sin embargo, es importante resaltar que el uso real por persona (así como de instituciones y otros usos) no será necesariamente coherente con estas pautas. Asimismo, según la experiencia de los autores de esta guía, los diseños de sistemas de agua mediante energía solar, basados en el cumplimiento de las recomendaciones completas de las pautas de la agencia o del gobierno, por lo general conducen a sistemas diseñados para una gran capacidad innecesaria. Un sistema diseñado de esta manera puede generar limitaciones financieras, a menos que las partes involucradas en el proyecto estén preparadas para cubrir esos costos.

La cantidad de agua utilizada para todos los propósitos puede variar mucho, tanto por región como por práctica individual. Por lo tanto, el conocimiento práctico de los patrones de uso del agua de una comunidad, que por lo general se obtiene solo mediante la interacción con los miembros de la comunidad, beneficiará en gran medida al diseñador del sistema de agua mediante energía solar. Si existen datos que detallen el uso real de agua de una comunidad, o si es posible recopilarlos, esto generalmente será de mayor valor para el diseñador.

También se debe reconocer que los patrones de uso del agua pueden variar a largo del año y a menudo lo hacen. Por lo tanto, el uso de un promedio diario durante el año puede derivar en una cantidad inadecuada de agua disponible durante la temporada en la que el uso de agua sea más alto. Por lo tanto, también es importante determinar las estaciones del año durante las cuales se requerirá que el sistema de agua mediante energía solar proporcione agua, lo cual puede suceder o no durante todo el año. Todas las partes involucradas en el proyecto deben estar de acuerdo con esta determinación.

Incluso después de determinar los usos del agua, es muy posible que estas cifras no se reflejen en el uso real de agua del sistema de agua mediante energía solar. Una de las razones para ello es que la población del área de servicio puede continuar recolectando agua de fuentes distintas al sistema de agua mediante energía solar. Esto puede deberse a que están familiarizados con una fuente de agua, la distancia al punto de recolección de agua u otras posibles razones. La colocación de un punto de recolección de agua cercano a los usuarios generalmente aumenta el uso de dicha agua, mientras que la distancia generalmente lo resta (esto significa que el uso por lo general está influenciado por el sistema de distribución de agua en una comunidad, pero esta guía no cubre el diseño del sistema de distribución).

Como se mencionó en **2.2.6. Demanda del diseño**, la demanda diaria de agua en el sistema de agua mediante energía solar por sí sola será fundamental para el diseño del sistema. En otras palabras, el agua recolectada de otras fuentes no debe contabilizarse en la demanda del diseño en la que se basará el diseño del sistema.

Antes de la presentación de las pautas de varias agencias, también debe tenerse en cuenta que todos los códigos, normas o regulaciones de las autoridades gubernamentales con respecto a los índices de uso del agua deben seguirse en todos los proyectos de agua implementados dentro del área de jurisdicción exigible de la autoridad gobernante. Si la autoridad gobernante no tiene jurisdicción exigible sobre el área del proyecto, o si la autoridad no tiene requisitos establecidos, entonces se puede utilizar esta guía.

Organización Mundial de la Salud

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define los requisitos de hidratación como la ingesta diaria mínima de líquidos necesaria para mantener la vida humana en función de los factores físicos, ambientales y de estilo de vida. Mediante el uso de esta definición, la OMS recomienda proporcionar aproximadamente tres litros de agua segura por persona por día.

Requisitos de hidratación de la OMS (OMS, 2003):

PERSONA	CONDICIONES NORMALES (LITROS/DÍA)	TRABAJO MANUAL O ALTAS TEMPERATURA (LITROS/DÍA)
Hombre adulto	2.9	4.5
Mujer adulta	2.2	4.5
Niño (10 años)	1.0	4.5

Otros usos del agua que afectan la demanda incluyen la cocina, la higiene y la limpieza. La cantidad de agua segura necesaria para cocinar puede variar según los tipos de alimentos que sean comunes en las diversas culturas. Según la OMS, la cantidad promedio de agua necesaria para cocinar arroz es de entre 1.6 y 2 litros por persona al día. Esta estimación se utiliza como una pauta muy básica con el fin determinar las necesidades de agua para cocinar, pero en muchos lugares los requisitos reales varían mucho. Sobre la base de un estudio realizado en Kenia, Uganda y Tanzania, la OMS determinó una demanda de base para las necesidades de higiene e instalaciones sanitarias, tales como lavarse las manos, lavar los platos, así como bañarse. Para el lavado de manos y de platos en estos lugares, la OMS determinó que la demanda era de 6.6 L con 7.3 L adicionales para bañarse.

En una situación de desastre, estos estándares se adaptan con el fin de proporcionar suficiente agua segura para satisfacer las necesidades más básicas de cada persona. En este caso, la OMS sugiere un mínimo de 7.5 L por persona al día (2003), lo cual es coherente con el estándar del Proyecto Esfera (ver El Proyecto Esfera a continuación).

Asimismo, la OMS recomienda una cantidad mínima de agua para diversas aplicaciones de cuidado de la salud.

Cantidades mínimas de agua necesarias según la OMS en el ámbito de la atención de la salud (OMS, 2008):

INDICADOR	
Pacientes ambulatorios	5 litros/consulta
Pacientes internados	40-60 litros/paciente/día
Quirófano o unidad de maternidad	100 litros/intervención
Centro de alimentación seca o suplementaria	0.5-5 litros/consulta (según tiempo de espera)
Centro de alimentación húmeda suplementaria	15 litros/consulta
Centro de alimentación terapéutica para pacientes internados	30 litros/paciente/día
Centro de tratamiento del cólera	60 litros/paciente/día
Centro de aislamiento de enfermedades respiratorias agudas graves	100 litros/paciente/día
Centro de aislamiento de fiebre hemorrágica viral	300-400 litros/paciente/día

El Proyecto Esfera

Como estándar mínimo promedio para una respuesta humanitaria, el Proyecto Esfera ha determinado que la cantidad de agua necesaria para beber, cocinar y llevar a cabo la higiene básica está entre 7.5 y 15 litros por persona al día (2018). La edición 2018 del Manual Esfera enumera diferentes necesidades de agua, la cantidad aproximada de agua requerida para cada necesidad y el uso de agua en varias instituciones. Se debe tener en cuenta que estas cantidades varían mucho según las normas regionales, sociales y culturales.

Necesidades básicas de agua del proyecto Esfera (Esfera, 2018):

NECESIDAD	AGUA REQUERIDA	FACTORES
Necesidades para supervivencia: ingesta de agua (bebida y comida)	2.5-3 litros por persona al día	Depende del clima y la fisiología del individuo
Prácticas básicas de higiene	2-6 litros por persona al día	Depende de las normas sociales y culturales
Necesidades básicas para cocinar	3-6 litros por persona al día	Depende del tipo de comida y de las normas sociales y culturales
Necesidades Básicas De Agua Totales:	7.5-15 litros por persona al día	

Además del uso personal (como se mencionó anteriormente), las instituciones que rodean un sistema de agua afectarán la demanda general de agua en ese sistema. El Proyecto Esfera también proporciona orientación sobre las demandas usuales de agua de diferentes tipos de instituciones.

Requerimientos de agua para instituciones del Proyecto Esfera (Esfera, 2018):

INSTITUCIÓN	REQUERIMIENTOS DE AGUA
Centros de salud y hospitales	5 litros por paciente ambulatorio al día; 40 a 60 litros por paciente hospitalizado al día. Es posible que se necesiten cantidades adicionales para equipos de lavandería, inodoros, etc.
Centros de cólera	60 litros por paciente al día; 15 litros por cuidador al día
Centros de alimentación terapéutica	30 litros por paciente internado al día; 15 litros por cuidador al día
Centros de recepción y tránsito	15 litros por persona al día para personas que se queden más de un día; 3 litros por persona al día para personas que se queden menos de un día
Escuelas	3 litros por alumno al día para beber y lavarse las manos (no se incluye el uso de los inodoros; ver baños públicos a continuación)
Mezquitas	2-5 litros por persona al día para beber y lavarse las manos
Baños públicos	1-2 litros por usuario al día para lavarse las manos; 2-8 litros por cubículo al día para la limpieza del inodoro
Inodoros con descarga	20-40 litros por usuario al día para inodoros con descarga convencional conectados a alcantarillado; 3-5 litros por usuario al día para inodoros con cisterna
Lavado anal	1-2 litros por persona al día
Ganado	20-30 litros por animal grande/mediano al día; 5 litros por animal pequeño al día

ACNUR (Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados)

El ACNUR utiliza un conjunto de estándares e indicadores de agua, saneamiento e higiene (ASH) para monitorear la efectividad de un programa con respecto al cumplimiento de las necesidades y objetivos básicos. Aquí se incluyen estándares de cantidad de agua para individuos y edificios comunales. Cabe señalar que los estándares e indicadores de ASH del ACNUR abordan la cantidad de agua, el acceso al agua, la calidad del agua, el saneamiento, la higiene y los desechos sólidos. Sin embargo, este documento guía hará referencia únicamente a los estándares e indicadores relacionados con la cantidad de agua.

Estándares e indicadores de ASH del ACNUR, abril de 2018 (ACNUR, 2018):

INDICADOR	ESTÁNDAR DE EMERGENCIA ¹	ESTÁNDAR POSTERIOR A LA EMERGENCIA
Litros promedio de agua potable ² disponible por persona al día (L/p/d)	≥ 15	≥ 20
Porcentaje de hogares con capacidad de almacenamiento de agua potable de al menos 10 litros/persona	≥ 70%	≥ 80%

¹ Una emergencia se define como los primeros seis meses después de que el movimiento de población se haya estabilizado. Sin embargo, esta definición es específica del contexto y solo debe servir como orientación general.

² Agua potable: segura para beber

Estándares ASH de ACNUR para edificios comunales (ACNUR, 2018):

INDICADOR	
Escuelas	Promedio de 3 litros de agua potable disponible por estudiante al día
Clínicas de salud / Centro de alimentación nutricional	Promedio de 10 litros de agua potable disponible por paciente ambulatorio al día
	Promedio de 50 litros de agua potable disponible por paciente internado/cama al día

ACNUR también afirma que “las normas deben adaptarse en función del contexto o las normas nacionales existentes cuando sea apropiado”.

Otros códigos y estándares de diseño local

Si la ubicación de un sistema de agua está bajo la jurisdicción de un organismo gobernante local que tiene un código, norma o reglamento que se puede hacer cumplir con respecto a la cantidad de agua que se debe proporcionar a cada persona al día (y a instituciones locales u otros usos), entonces se debe seguir dicho requerimiento.

2.2.4. Predicción de la demanda de los individuos

Una vez que se determinan de manera razonable los usos del agua para el área de servicio, se puede calcular la demanda diaria de agua del proyecto del sistema de agua mediante energía solar. Para comenzar, Water Mission recomienda calcular el uso diario de agua individual de tres formas diferentes:



1. Demanda máxima en la puesta en servicio del sistema
2. Demanda prevista en la puesta en servicio del sistema
3. Demanda futura prevista

Estas tres demandas calculadas se utilizarán para seleccionar el uso de agua diario de las personas. Siguiendo la ecuación en **2.2. Demanda diaria de agua del proyecto**, el uso de agua diario seleccionado de los individuos se agregará a los otros usos diarios de agua y a las pérdidas diarias de agua del sistema para determinar la demanda diaria de agua del proyecto.

2.2.4.1. Demanda máxima en la puesta en servicio del sistema

La demanda máxima en la puesta en servicio del sistema se calcula asumiendo que el 100% de los miembros de la población del servicio utilizará la cantidad total de uso individual previamente determinada. Para calcular la demanda máxima de la puesta en servicio del sistema, se puede aplicar la siguiente ecuación:

DEMANDA MÁXIMA

Demanda máxima de la puesta en servicio del sistema = Población total del servicio × Cantidad total de uso individual

2.2.4.2. Demanda prevista en la puesta en servicio del sistema

Sin embargo, se reconoce que el 100% de las personas de una comunidad podrían no utilizar el sistema de agua mediante energía solar al momento de ser puesto en servicio. Por lo tanto, podría ser necesario predecir el porcentaje de la población que utilizará el agua segura o la “penetración poblacional prevista”. Asimismo, aquellos que recolectan agua del sistema podrían no utilizar la cantidad total de uso individual determinada. Por lo tanto, es posible que se decida que, en el período de tiempo inmediatamente posterior a la puesta en servicio del sistema, el uso individual sea menor que la cantidad total. Para calcular la demanda prevista de la puesta en servicio del sistema, se puede aplicar la siguiente ecuación:

DEMANDA PREVISTA

Demanda prevista en la puesta en servicio del sistema = Población total del servicio × % previsto de la población que usará el sistema × Uso individual

2.2.4.3. Demanda futura prevista

Para que el sistema de agua siga siendo sostenible y sirva a la comunidad el mayor tiempo posible, es útil estimar la demanda futura prevista. Esto indicará si el sistema tiene la capacidad de satisfacer la demanda de la población futura estimada. Sin embargo, es importante señalar que la demanda futura puede ser difícil de predecir debido al crecimiento de la población, la migración, el comercio, la urbanización y los eventos de desastres humanitarios.

Esta guía no proporciona tasas de crecimiento aproximadas para la población. En su lugar, estos índices se deben determinar utilizando los datos (o requisitos) gubernamentales de ubicaciones específicas. Una vez determinada, se puede utilizar la tasa de crecimiento (r) en la siguiente ecuación (Mihelcic, 2009). Para calcular la población futura (PN) en N años:



Photo courtesy of Water Mission

$$P_N = P_0 \times \left(1 + \frac{r}{100}\right)^N$$

Es importante señalar que este cálculo es únicamente una proyección. Asimismo, lo usual (pero no obligatorio) es que los sistemas de agua mediante energía solar utilicen un valor de 20 años para N.

Una vez que se determina la población futura prevista, se puede multiplicar por el porcentaje de uso de población previsto (si menos del 100% de las personas utilizarán el sistema en el futuro) y la cantidad de uso individual para determinar la demanda futura prevista. Esto se muestra en la siguiente ecuación:

DEMANDA FUTURA PREVISTA

Demanda futura prevista = Población futura × % previsto de la población que usará el sistema × Cantidad de uso individual prevista

2.2.5. Pérdidas de agua del sistema

Hay una última consideración de demanda diaria de agua del proyecto que es necesario considerar antes de tomar una decisión sobre una demanda de diseño. Las pérdidas de agua son comunes en los sistemas de agua por diversas razones. Las razones más comunes son el agua derramada o desperdiciada en los puntos de distribución, el desbordamiento dentro de los tanques de almacenamiento y las fugas en las tuberías de suministro y distribución. Incluso en el mundo desarrollado, es una práctica común tener en cuenta una cierta cantidad de pérdida de agua, en particular cuando se utilizan infraestructuras antiguas. Se debe tener en cuenta una cierta cantidad de desperdicio recurrente en el flujo de diseño del sistema. Para tener en cuenta esta pérdida, se puede agregar una cantidad conocida de pérdida diaria a la demanda diaria de agua o se puede agregar un porcentaje de la demanda diaria de agua al cálculo de la demanda. Como punto de referencia, se considera aceptable una pérdida diaria del cinco (5) al diez (10) por ciento. Si la pérdida de agua es mayor debido a una infraestructura vieja o instalada incorrectamente, se debe considerar la reparación o reemplazo de los componentes con fugas en el sistema.

2.2.6. Demanda del diseño

Las tres demandas de uso de agua diarias individuales calculadas afectarán la demanda de agua diaria del proyecto y, posteriormente, la demanda del diseño.

Al mantener la ecuación en **2.2. Demanda diaria de agua del proyecto**, los otros usos diarios de agua y las pérdidas de agua del sistema al día deberán agregarse a las demandas individuales de uso diario de agua para seleccionar una demanda de diseño final.

Se recomienda que el sistema se diseñe inicialmente para satisfacer la demanda individual prevista en la puesta en servicio del sistema. Una vez que el diseño esté completo, se puede comparar con la demanda individual máxima en la puesta en servicio del sistema y la demanda individual futura prevista. Si el sistema diseñado puede satisfacer las tres demandas calculadas, esto aumenta el nivel de confianza del diseño.

Si el diseño no puede satisfacer la demanda individual máxima de la puesta en servicio del sistema y la demanda individual futura prevista, esto no significa necesariamente que se deba revisar el diseño. En cambio, el ingeniero de diseño puede determinar qué cambios deberían realizarse para satisfacer estas dos demandas. Si estas alteraciones requieren una cantidad mínima de equipo y gastos de capital adicionales, entonces podría ser apropiado hacerlo. Sin embargo, si cumplir con las otras dos demandas aumentaría drásticamente el gasto de capital, entonces puede que no sea práctico o económicamente prudente. La recomendación de esta guía es que todas las partes involucradas en el proyecto debatan y tomen esta decisión al inicio del proyecto.

Asimismo, se debe reconocer que la demanda de diseño seleccionada puede no ser necesariamente igual a la demanda diaria de agua del proyecto calculada de acuerdo con **2.2. Demanda diaria de agua del proyecto**. Esto puede deberse a varias razones, incluyendo la eliminación gradual de un sistema de agua para un área de servicio, financiamiento inadecuado de gastos de capital completos, exclusión de ciertos usos de agua del sistema propuesto u otras razones.

La demanda de diseño elegida formará la base del diseño del resto del sistema. Para que un sistema completo de agua mediante energía solar tenga éxito es fundamental que la demanda del diseño esté claramente establecida y acordada por todas las partes involucradas en la planificación y futura propiedad del sistema, incluyendo la documentación del acuerdo. En la actualidad, se considera que muchos de los sistemas de agua que funcionan con energía solar tienen un rendimiento inferior debido a la falta de un cálculo claro, selección y acuerdo posterior sobre la demanda del diseño. Cabe señalar que la insatisfacción con estos sistemas no suele deberse a un rendimiento inadecuado del equipo, sino a una planificación y diseño inadecuados.

El siguiente ejemplo detalla la recopilación y deliberación de datos que se realiza para calcular la demanda diaria de agua del proyecto.

Ejemplo: Calcular la demanda diaria de agua del proyecto

(referencia IEC 62253 – 6.2. Datos del cliente, d. demanda de agua)

Una comunidad en la zona rural de Kenia actualmente recolecta agua potable de tres fuentes: un pozo equipado con una bomba manual, un río y arroyos estacionales que no tienen flujo durante la estación seca. La población de la comunidad ha crecido y siempre hay largas colas para usar la bomba manual. Asimismo, el río no es de fácil acceso para todos, ya que se encuentra en el extremo oeste de la comunidad. Se puso a disposición una fuente de financiación para diseñar e instalar un sistema de agua mediante energía solar para atender mejor las necesidades de agua segura bebible de la comunidad.

La comunidad está compuesta por 350 hogares y el número promedio de personas por hogar es de seis. Asimismo, hay una escuela en la comunidad con 700 estudiantes y los 700 estudiantes residen en la comunidad.

Después de debatir las necesidades de agua con los líderes de la comunidad, se determinó que el uso diario de agua por persona tiene el siguiente patrón.

USO DE AGUA	POR PERSONA AL DÍA
Beber y cocinar	4 a 6 litros
Higiene básica	2 a 4 litros
Productividad (ganadería, riego, lavandería, otros usos)	0 a 6 litros
USO TOTAL DIARIO DE AGUA:	6 a 16 litros

Paso 1: Determinar la población total pretendida que atenderá el sistema.

Antes de usar la ecuación provista en **2.2.1.1. Tipos de población: hogares**, debemos preguntarnos si el sistema pretende atender a los 350 hogares. ¿Tendrán estos hogares realmente acceso al agua proporcionada? Para este ejemplo, se determina que se pretende que los 350 hogares utilicen el agua de este proyecto. Por tanto, aplicando la ecuación:

$$\text{Población aproximada} = \text{Número de hogares} \times \text{Número promedio de personas por hogar}$$

$$2,100 \text{ personas} = 350 \text{ hogares} \times 6 \text{ personas por hogar}$$

Paso 2: Agregar a otras personas que usarán el agua.

Esta comunidad tiene una escuela de 700 estudiantes. Si todos o algunos de estos estudiantes no se contabilizaron en el cálculo anterior, entonces se podría agregar estos estudiantes a la cifra de la población o la cantidad total de agua utilizada para esta institución podría agregarse más tarde a la demanda. Sin embargo, en este ejemplo asumiremos que los 700 estudiantes residen en la comunidad. Por lo tanto, ya están contabilizados en la ecuación anterior.

Paso 3: Determinar cuánta agua recolectará cada persona del sistema cada día.

La tabla anterior dio un rango de 6 a 16 litros por persona al día según los diversos usos y las diversas cantidades para cada uso. Sin embargo, es importante que el sistema de agua mediante energía solar esté diseñado para suministrar solo la cantidad de agua que se pretende recolectar del sistema. En esta comunidad, la gente recolectará del sistema toda el agua utilizada para beber y cocinar. Solo recolectarán parte del agua que usan para la higiene del sistema y no recolectarán del sistema nada de agua de su productividad. Con esta información, se determina que la persona promedio en la comunidad recolectará de seis a ocho litros del sistema al día (para obtener información adicional, ver **2.2.3. Área de uso de agua de servicio**)

Paso 4: Calcular la demanda de agua individual.

En **2.2.4. Predicción de la demanda**, se presenta el cálculo para tres tipos diferentes de demandas individuales. Usando la información anterior de esta comunidad, ahora calcularemos los tres.

El cálculo de la demanda máxima de la puesta en servicio del sistema se realiza utilizando la información ya proporcionada.

$$\begin{aligned} \text{Demanda máxima en la puesta en servicio del sistema} = \\ \text{Población total del servicio} \times \text{Cantidad total de uso individual} \end{aligned}$$

$$16,800 \text{ litros por día} = 2,100 \text{ personas} \times 8 \text{ litros por persona al día}$$

Para realizar el cálculo de la demanda prevista al momento de la puesta en servicio del sistema, es necesario determinar el porcentaje de la población que recolectará agua del sistema. Es raro que el 100% de la población

recolecte agua del sistema. Para esta comunidad, determinamos que el 85% de la población utilizará el sistema al momento de la puesta en servicio. Asimismo, para llevar a cabo este cálculo, si hay una razón para creer que las personas recolectarán menos de la cantidad individual total de agua por día, entonces se debe usar una cifra menor. Como se mencionó anteriormente para el caso de esta comunidad, se cree que las personas recolectarán entre seis y ocho litros al día. Promediaremos esto a siete litros al día para el cálculo.

*Demanda prevista en la puesta en servicio
del sistema = Población total del servicio × % previsto de la población que usará
el sistema × Uso individual previsto en la puesta en servicio*

$$12,495 \text{ litros por día} = 2,100 \text{ personas} \times 85\% \times 7 \text{ litros por persona al día}$$

Para calcular la demanda futura prevista, primero se debe determinar la población futura. Mediante el uso de los datos del gobierno para esta región de Kenia, se determina que la región crece a una tasa del 2% anual y lo que deseamos analizar es el periodo dentro de 20 años. Usando la ecuación proporcionada en **2.2.4.3.**

Demanda futura prevista para calcular las poblaciones futuras:

$$2,100 \text{ personas} \times \left(1 + \frac{2(\%)}{100}\right)^{20} = 3,120 \text{ personas}$$

Luego, de manera similar al cálculo de la demanda prevista para la puesta en servicio del sistema, se necesita una determinación del porcentaje de la población que recolectará agua del sistema, así como el uso individual previsto. Estas dos cifras pueden ser diferentes de las utilizadas en el cálculo de la demanda prevista para la puesta en servicio del sistema, si es que hay motivos para creer que serán diferentes. Para este ejemplo, todavía usaremos el 85% y siete litros por persona al día.

*Demanda futura prevista = Población futura × % previsto de la población
que utilizará el sistema × Cantidad de uso individual previsto*

$$18,564 \text{ litros por día} = 3,120 \text{ personas} \times 85\% \times 7 \text{ litros por persona al día}$$

La sección **2.2.6. Demanda del diseño** recomienda que el sistema se diseñe utilizando la Demanda Prevista de la Puesta en Marcha del Sistema (a menos que todas las partes involucradas estén de acuerdo en que otra demanda sería más aplicable a los objetivos del proyecto). En este ejemplo, esa demanda es de 12,495 litros al día.

Paso 5: Considerar otros usos diarios del agua y las pérdidas de agua del sistema al día.

En el Paso 2 determinamos que la población escolar ya se contabilizó en el cálculo de población del Paso 1. La sección **2.2.5. Pérdidas de agua del sistema** establece que una pérdida diaria del cinco al diez por ciento se considera aceptable. Dado que este sistema utilizará todos los componentes nuevos y lo instalarán contratistas calificados, utilizaremos el 5%.

$$12,495 \text{ litros al día} + 5\% \text{ debido a la pérdida de agua diaria} = 13,120 \text{ litros al día}$$

La sección **2.2. Demanda diaria de agua del proyecto** establece que los componentes básicos del cálculo de la demanda de agua incluyen:

- calcular la población total y el consumo diario de agua de los individuos,
- determinar cualquier otro uso del agua que proporcionará el sistema de agua propuesto y
- evaluar las pérdidas de agua del sistema existentes.

La sección **2.2. Demanda diaria de agua del proyecto** también da la siguiente ecuación general:

$$\text{Demanda diaria de agua del proyecto} = \text{Uso diario individual de agua} \times \text{Población del área de servicio} + \text{Otros usos diarios del agua (instituciones, ganadería, comercial, industrial, recreativo, etc.)} + \text{Pérdidas de agua del sistema al día}$$

En el ejemplo anterior, analizamos cada uno de estos componentes para determinar que la Demanda Diaria de Agua del Proyecto será igual a 13,120 litros al día.

2.3. Fuente de agua

(referencia IEC 62253 - 6.2 Datos del cliente, c. condiciones locales específicas)

La fuente de agua que utilizará el sistema define en gran medida el diseño de cualquier sistema de agua. El diseño del sistema se verá afectado tanto por el tipo de fuente como por la cantidad de agua disponible de la fuente (o rendimiento de la fuente). Históricamente, el agua subterránea ha sido la fuente de agua más usual para sistemas de agua mediante energía solar. Sin embargo, en muchos casos, también se han utilizado fuentes de agua superficial, ya que los fabricantes de equipos solares de bombas de agua tienen líneas completas de equipos para adaptarse también a diferentes fuentes de agua superficial.

Al elegir una fuente de agua, es fundamental para la calidad del agua que cualquier eliminación de aguas residuales esté a una distancia mínima de 30 metros de la fuente (Sphere, 2018). La eliminación de aguas residuales a menos de 30 metros de la fuente de agua no solo pone en peligro a los usuarios del agua, sino que también afecta el diseño y el rendimiento del sistema de agua final. Asimismo, la fuente de agua elegida no debe estar gradiente abajo de ninguna fuente potencial de contaminación.

2.3.1. Rendimiento de la fuente

Conocer el rendimiento disponible o el caudal de una fuente de agua es crucial para diseñar un sistema de agua. Desafortunadamente, no es inusual que una estimación del rendimiento no basada en pruebas se utilice para diseñar y seleccionar equipos. Por lo general, esto conduce a desafíos significativos con respecto al rendimiento real del equipo y la fuente de agua. El equipo del proyecto debe dimensionarse para el rendimiento de la fuente específica. Asimismo, el rendimiento de la fuente debe satisfacer, y de preferencia superar, la demanda de agua calculada por el proyecto para garantizar que se proporcione suficiente agua a la comunidad. Un rendimiento de fuente preciso no solo brindará información sobre la selección de la bomba y el motor, sino también del diseño del panel solar.

Primero se debatirá el mejor método para determinar el rendimiento de la fuente de un pozo, seguido de comentarios sobre el rendimiento de una fuente de agua superficial. Por último, se abordarán otras consideraciones relativas al rendimiento de la fuente de agua al planificar y diseñar un sistema de agua mediante energía solar.

2.3.1.1. Rendimiento de la fuente de agua de un pozo

Es imposible conocer el rendimiento de un pozo con solo mirarlo o monitorear el proceso de perforación. Dos pozos de la misma profundidad y diámetro pueden producir diferentes cantidades de agua según las formaciones geológicas, los acuíferos circundantes y otras extracciones de agua. Los pozos pueden proporcionar solo un caudal limitado durante un periodo prolongado. Por este motivo, es esencial realizar una prueba de rendimiento en cualquier pozo que pueda usarse como fuente. El propósito de una prueba de rendimiento es determinar el caudal que se puede bombear de forma sostenible desde el pozo. Asimismo, también se debe tener en cuenta cualquier cambio potencial en los resultados de las pruebas de rendimiento debido a las fluctuaciones estacionales de las condiciones del agua subterránea del área y otras extracciones de agua.



Rendimiento de la fuente de agua de un pozo

Dos pozos de la misma profundidad y diámetro podrían producir diferentes cantidades de agua según las formaciones geológicas y acuíferos circundantes. Los pozos pueden proporcionar solo un caudal limitado durante un periodo prolongado.



2.3.1.1.1. Comprendiendo el descenso de nivel

Al realizar una prueba de rendimiento, el técnico debe registrar estos parámetros primarios: tiempo, caudal, nivel de agua y reducción. Si bien es usual medir el tiempo, el caudal y el nivel del agua, el descenso de nivel puede ser más difícil de comprender. El descenso de nivel es la diferencia entre el nivel de agua estático (cuando no se está bombeando agua) y el nivel de agua dinámico cuando se está bombeando agua desde el pozo. Si bien el técnico no puede ver el interior del pozo, es importante visualizar lo que está sucediendo durante la prueba de rendimiento para medir correctamente el descenso de nivel. La siguiente figura ilustra lo que sucede con el nivel del agua cuando el agua se bombea fuera del pozo.

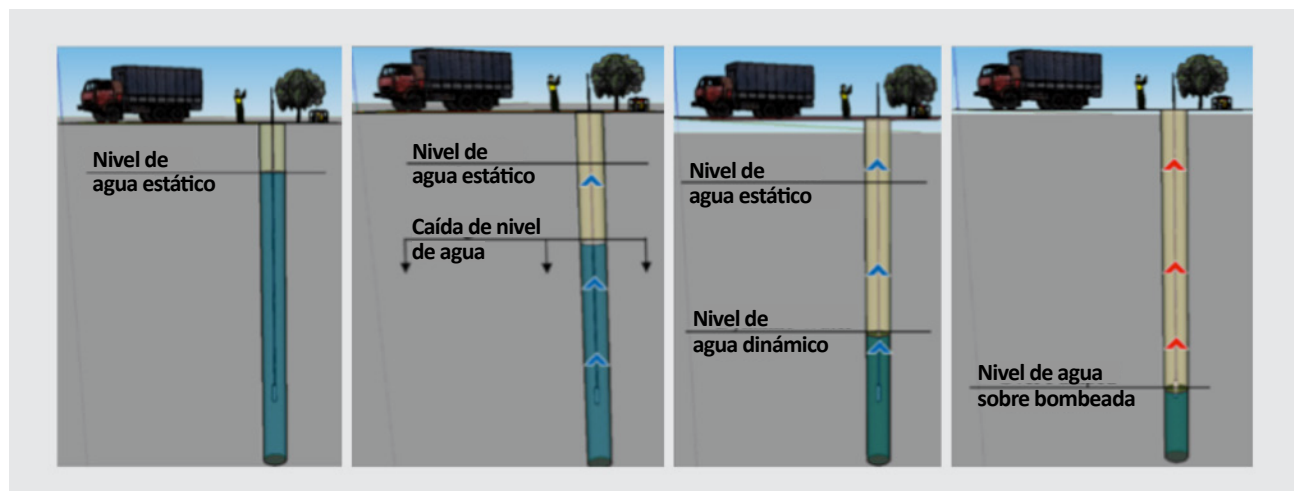


Figura 2.3.1.1.1.— Nivel de agua durante el bombeo

Etapas 1: Nivel de agua estático (sin bombeo)

Antes de que se encienda la bomba, el nivel del agua en el pozo está en su nivel de agua estático.

Etapas 2: Caída del nivel del agua (la velocidad de bombeo excede la velocidad de agua que ingresa al pozo)

Cuando la bomba comienza a bombear agua, el nivel del agua en el pozo comienza a descender. El agua de los acuíferos circundantes comenzará a fluir hacia el pozo, de manera lenta al principio, pero aumentando en velocidad a medida que se continúa extrayendo agua. En principio, si se bombea más agua de la que fluye de regreso, el nivel del agua en el pozo seguirá bajando.

Etapas 3: Nivel de agua dinámico (la velocidad de bombeo es igual a la velocidad de agua que ingresa al pozo)

A medida que el nivel del agua continúe bajando dentro del pozo, la velocidad a la que el agua ingresa al pozo desde el acuífero circundante comenzará a aumentar. Al principio, el descenso de nivel y el flujo son directamente proporcionales entre sí. A medida que uno aumenta, también lo hace el otro. A medida que la velocidad de agua que fluye hacia el pozo se vuelve igual a la velocidad de agua que se bombea, el nivel del agua en el pozo llegará a un equilibrio. Cuando esto sucede, el nivel del agua se denomina nivel dinámico del agua. El nivel dinámico del agua en un pozo cambiará dependiendo de la velocidad de bombeo. Por ejemplo, si la velocidad de bombeo es muy baja en comparación con el rendimiento del pozo, el nivel dinámico del agua podría estar cerca del nivel estático del agua. Si se aumenta la velocidad de bombeo, el pozo puede alcanzar un nuevo equilibrio con un nivel de agua dinámico más bajo. El nivel de agua dinámico que corresponde al rendimiento máximo del pozo se denomina nivel de agua dinámico máximo.

Etapas 4: Nivel de agua sobre bombeada (la velocidad de agua que ingresa al pozo no puede alcanzar a la velocidad de bombeo)

Si se permite que la velocidad de bombeo aumente más allá del rendimiento máximo del pozo, el nivel del agua seguirá bajando. Esto ocasionará una condición de sobre bombeado, lo cual podría provocar efectos negativos en el acuífero circundante y bioincrustación del pozo. Asimismo, esta condición podría ocasionar fallas en el sistema de agua y la bomba, provocando una falta de suministro de agua a los usuarios del sistema de agua. Un sistema de agua diseñado de manera correcta y una bomba bien seleccionada nunca permitirán que la velocidad de bombeo exceda el rendimiento máximo del pozo.

2.3.1.1.2. Prueba de rendimiento máximo de los pozos

La especificación de la prueba de rendimiento máximo se amplía a una prueba de rendimiento de descenso de nivel gradual tradicional para determinar las características hidráulicas del pozo y establecer el rendimiento máximo de la fuente. A continuación, se muestra la descripción y el procedimiento de la prueba y se incluye un ejemplo completo de esta prueba en el **Anexo c. Realizar una prueba de rendimiento máximo**. Las normas adicionales para los procedimientos de prueba de rendimiento se pueden encontrar en ISO 14686:2003.

2.3.1.1.2.1. Descripción

Durante esta prueba, se bombeará agua desde la fuente y se modificará el caudal en pasos (o intervalos que aumenten el caudal y el descenso de nivel correspondiente) hasta que se alcance el nivel máximo dinámico de agua. La posición de la bomba en el pozo (es decir, la elevación de la bomba) durante esta prueba es crucial para determinar el verdadero rendimiento máximo del pozo. La bomba debe ajustarse al nivel más bajo posible para la construcción del pozo, que por lo general está alrededor de medio metro por encima del fondo del pozo. Si la bomba se ajusta a un nivel demasiado alto durante la prueba, luego el nivel del agua bajará al nivel mínimo determinado antes de que se pueda encontrar el rendimiento máximo. El nivel mínimo determinado es unos metros por encima de la elevación de la bomba (o unos metros por encima del sensor de funcionamiento en seco de la bomba, si es que estuviera equipado), lo cual proporcionará un sumergimiento adecuado de la bomba.

Para realizar una prueba de rendimiento máximo, también es crucial la selección adecuada de la bomba, ya que la capacidad de la bomba de prueba debe ser mayor o igual al rendimiento máximo previsto del pozo (con el rendimiento máximo previsto basado en proyecciones hidrogeológicas, información de perforación, el rendimiento de otras perforaciones en el área u otros datos pertinentes). Otros componentes, incluida la tubería ascendente, los accesorios, la válvula de compuerta utilizada en la superficie del suelo para regular el flujo, el medidor de flujo, etc., deben tener el tamaño adecuado para el objetivo previsto y proporcionar el máximo rendimiento.

Al inicio de la prueba, la válvula reguladora está casi completamente cerrada en la descarga del pozo y luego se abre en intervalos de 60 minutos (o un intervalo de tiempo más largo, si así se desea o se necesita para estabilizar el nivel del agua). Con cada intervalo, la válvula reguladora se abre para aumentar la descarga hacia el caudal objetivo mientras se monitorean el nivel del agua en el pozo y el caudal de descarga. El objetivo es registrar el nivel de agua dinámico y el caudal de descarga en cada intervalo para encontrar el caudal que corresponde al nivel de agua dinámico máximo.

2.3.1.1.2.2. Procedimiento de la prueba

A. Diseñar la prueba:

- a. Estimar los caudales mínimos y máximos del pozo. El caudal máximo se puede aproximar a partir de estimaciones de rendimiento desarrolladas durante la perforación/construcción, registros de pruebas de rendimiento y/o índices de bombeo de la fuente en el pasado, rendimiento de fuentes similares en el área, etc. El caudal mínimo debe ser pequeño en comparación con el caudal máximo estimado, pero aun así debe ser suficiente para proporcionar un flujo de agua adecuado a través de la bomba para evitar el sobrecalentamiento, la pérdida de lubricación, etc.
- b. Dividir la diferencia entre los caudales mínimo y máximo en cuatro a seis cantidades iguales. El caudal objetivo aumentará en esta cantidad durante cada intervalo.
- c. Utilizando la cantidad del intervalo, determine los caudales objetivo para la prueba definidos de la siguiente manera:
 - i. **Caudal objetivo 1** = Caudal mínimo
 - ii. **Caudal objetivo 2** = Caudal objetivo 1 + cantidad de intervalo calculada en A.b
 - iii. **Caudal objetivo 3** = Caudal objetivo 2 + cantidad de intervalo calculada en A.b
 - iv. **Caudal objetivo 4** = Caudal objetivo 3 + cantidad de intervalo calculada en A.b
 - v. **Caudal objetivo 5** = Caudal objetivo 4 + cantidad de intervalo calculada en A.b
 - vi. **Continúe aumentando el caudal objetivo tantas veces como sea necesario hasta que se determine el rendimiento máximo.**

B. Retirar la bomba existente, tubería ascendente, etc., si es necesario.

C. Limpiar y desinfectar todos los componentes que se colocarán en la fuente para evitar que se contaminen con el equipo de prueba.



D. Medir y registrar el diámetro y la profundidad total (profundidad hasta el fondo sólido) del pozo.

E. Instalar la bomba de prueba a la profundidad/ubicación deseada y ensamblar la tubería, el cableado, el medidor, la válvula de compuerta, así como las mangueras y/o tuberías necesarias.

F. Medir y registrar el nivel de agua estático.

G. Ajustar la válvula de compuerta para que esté casi completamente cerrada.

H. Encender el generador y encender la bomba.

Toda el agua extraída debe descargarse fuera del pozo para no permitir que fluya de regreso hacia el pozo. Se acordará una ubicación con el propietario del proyecto y las otras partes involucradas en el proyecto para descargar de manera adecuada toda el agua extraída.

I. Caudal objetivo 1

- a. Ajustar (abrir) la válvula de compuerta para alcanzar el caudal objetivo 1.
- b. Registrar el caudal de descarga y el nivel del agua en intervalos de 1 minuto durante los primeros 15 minutos y luego a intervalos de 5 minutos durante lo restante del paso de 60 minutos (o un intervalo de tiempo más largo, si así se desea o se necesita para estabilizar el nivel del agua).
- c. Si el caudal cambia en más del 10% en cualquier momento durante los 60 minutos, ajustar la válvula de compuerta para tratar de mantener el caudal objetivo dentro del 10%, teniendo mucho cuidado de no ajustar demasiado.

J. Caudal objetivo 2

- a. En el minuto 60, ajustar (abrir) la válvula de compuerta para alcanzar el caudal objetivo 2.
- b. Registrar el caudal de descarga y el nivel del agua en intervalos de 1 minuto durante los primeros 15 minutos y luego a intervalos de 5 minutos durante lo restante del paso de 60 minutos.
- c. Si el caudal cambia en más del 10% en cualquier momento durante los 60 minutos, ajustar la válvula de compuerta para tratar de mantener el caudal objetivo dentro del 10%, teniendo mucho cuidado de no ajustar demasiado.

K. Repetir el paso J para los caudales objetivo 3, 4 y 5.

- a. Si el nivel del agua cae al nivel mínimo determinado en cualquier momento durante estos intervalos, reducir el caudal para que el nivel del agua no baje más allá del mínimo.

El objetivo es que el caudal de descarga y el nivel dinámico del agua se estabilicen en el nivel mínimo determinado o lo más cerca posible. Ajustar lentamente el caudal hasta alcanzar este objetivo. Luego, proceder al paso M.

L. Si no se ha alcanzado el nivel mínimo determinado, continúe aumentando el caudal objetivo en la cantidad de intervalo cada hora. Registrar el caudal de descarga y el nivel del agua como se describe en el Paso J. Si el nivel del agua cae al nivel mínimo determinado en cualquier momento durante estos intervalos, reducir el caudal para que el nivel del agua no baje más allá del mínimo. El objetivo es que el caudal de descarga y el nivel dinámico del agua se estabilicen en el nivel mínimo determinado o lo más cerca posible. Ajustar lentamente el caudal hasta alcanzar este objetivo. Luego, continuar con el Paso M o N según la opción que se describe a continuación.

M. Como opción, también se permite omitir el Paso M y continuar con el Paso N, si es que el paso M se realizará en un día diferente. Si el Paso M se realiza en un día diferente, los Pasos N a P deben completarse después del Paso L (es decir, el primer día de prueba) y después del Paso M (es decir, el segundo día de prueba). Para completar este paso, se debe mantener el nivel máximo de agua dinámico y caudal de descarga determinados en el Paso K o L para el resto de la prueba de 24 horas. 24 horas es la duración mínima de tiempo. Si se desea, o se necesita debido otras razones, la prueba puede exceder las 24 horas.

- a. Continuar haciendo pequeños ajustes a la válvula de compuerta según sea necesario para mantener el caudal de descarga dentro del 10% del caudal determinado en el Paso K o L.
- b. Registrar el caudal de descarga y el nivel dinámico del agua en incrementos de 1 hora hasta que haya transcurrido un periodo de 24 horas desde el comienzo del Paso H (o del comienzo del Paso M si se realiza en un día diferente).
- c. Si el caudal de descarga y el nivel dinámico de agua continúan siendo estables y permanecen en el nivel mínimo determinado o por encima de este, entonces este caudal de descarga es el rendimiento máximo.

N. Al finalizar el periodo de prueba de bombeo, apagar la bomba (y el generador según corresponda).

O. El nivel del agua en el pozo se recuperará tan pronto se apague la bomba. Este periodo de recuperación es tan importante como el periodo de bombeo, ya que este período también indica la transmisividad del acuífero que rodea al pozo. El nivel del agua debe registrarse cada minuto durante los primeros quince minutos después de apagar la bomba. Luego, el nivel del agua debe registrarse cada cinco minutos hasta que hayan pasado 60 minutos desde que se apagó la bomba. Después de esto, el nivel del agua debe registrarse cada diez minutos hasta que el nivel del agua retorne al nivel estático del agua o esté dentro del 10% del nivel estático del agua. Si el nivel del agua no se recupera para estar dentro del 10% de las condiciones previas a la prueba, los resultados de la prueba de rendimiento no pueden considerarse concluyentes y es necesario realizar más pruebas (o repetir las pruebas).

P. Al final de la prueba, retirar todo el equipo de prueba y limpiar y restaurar el sitio a su estado original, recordando limpiar y desinfectar cualquier bomba, tubería, cable, etc.



Rendimiento de fuente de agua de una fuente superficial

Podría no ser necesario probar el rendimiento disponible de muchas fuentes de agua superficiales, debido a la gran cantidad de agua disponible. Esto aplicaría a lagos, ríos grandes y manantiales de alta capacidad.



2.3.1.1.3. Opciones de prueba de rendimiento de pozo

La prueba de rendimiento máximo descrita anteriormente es la opción recomendada para determinar el rendimiento máximo de un pozo. Sin embargo, existen otras dos opciones para determinar las características de un pozo. La primera, denominada prueba de rendimiento específico, consiste en apuntar a un rendimiento menor que el rendimiento máximo del pozo. La razón principal para realizar tal prueba será si el flujo de diseño (ver **3.1. Flujo de diseño**) para el sistema de agua propuesto será significativamente menor que el rendimiento máximo del pozo. Podría aún haber interés en conocer el rendimiento máximo (por ejemplo, comparación con pozos en el área circundante, recopilación de datos sobre el acuífero, posible uso futuro del pozo). La realización de una prueba de rendimiento específica es similar a la prueba de rendimiento máximo. El principal cambio en el procedimiento de prueba es dejar de aumentar el caudal de descarga cuando se alcanza el caudal específico deseado. El ingeniero responsable del proyecto debe tomar la decisión de realizar este tipo de prueba.

La segunda opción es realizar la prueba de rendimiento durante menos de 24 horas. La razón principal para elegir esta opción sería si existe una preocupación o limitación significativa con respecto a realizar la prueba durante la duración completa como se describió anteriormente. Como mínimo, la prueba de rendimiento debe durar tanto como la producción diaria prevista del proyecto de agua. Por ejemplo, una bomba alimentada únicamente con energía solar podría producir agua solo durante aproximadamente 7 a 8 horas al día. En este caso, una prueba de 7 a 8 horas puede ser suficiente, si no es posible realizar una prueba de 24 horas. Sin embargo, es importante señalar que el hecho de que un pozo produzca un determinado flujo durante una o dos horas no significa que pueda mantener ese caudal durante periodos prolongados de tiempo. Asimismo, como se indica en los Pasos anteriores, las pruebas se pueden realizar durante dos días y llevar a cabo el Paso M en un día diferente. Nuevamente, el ingeniero responsable del proyecto es quien debe tomar la decisión sobre qué tipo de prueba de rendimiento se debe realizar o cuál es aceptable.

2.3.1.2. Rendimiento de la fuente de agua de una fuente superficial

Es posible que no sea necesario probar el rendimiento disponible de muchas fuentes de agua superficial debido a la gran cantidad de agua disponible. Esto se aplicaría a grandes lagos, ríos y manantiales de gran capacidad. Sin embargo, en el caso de arroyos pequeños y manantiales de baja capacidad, es fundamental contar con un medio para determinar el rendimiento de agua disponible. Independientemente del método utilizado, conocer el rendimiento de la fuente es decisivo para el éxito del sistema de agua mediante energía solar.

Otro factor a considerar al momento de realizar el diseño es la posibilidad de que la fuente de agua superficial pueda experimentar una temporada de bajo rendimiento de manera anual o solo durante las estaciones secas. Asimismo, si hay otros usuarios de agua que se encuentran aguas abajo de la fuente de agua, mantener el flujo que necesitan los usuarios que se encuentran aguas abajo también es una consideración necesaria para el diseño.



Foto cortesía de Water Mission

2.3.1.3. Rendimiento seguro o rendimiento permitido

Una de las preocupaciones comunes al usar cualquier tipo de bomba mecanizada o mediante energía solar es el bombeo excesivo o la extracción excesiva. Esta es una de las razones por las que una prueba de rendimiento realizada correctamente en la fuente de agua es fundamental para el diseño de un proyecto de agua mediante energía solar. Una bomba demasiado grande que esté instalada de manera permanente dañará la hidrología natural y la bomba misma con el tiempo. Una bomba de tamaño insuficiente puede generar frustración en los usuarios que esperaban una mayor tasa de producción de agua. El motivo de llevar a cabo una prueba de rendimiento de manera correcta es elegir una bomba que equilibre el rendimiento disponible de la fuente con las necesidades de los usuarios del agua.

También es importante reconocer que el rendimiento de la fuente puede cambiar estacionalmente (por ejemplo, un rendimiento menor en la estación seca y un rendimiento más alto en la estación lluviosa). Si este es el caso, es recomendable probar la fuente en la época del año en la que el rendimiento será el más bajo. Si el proyecto en cuestión no puede esperar a que se realice una prueba de rendimiento durante la temporada del rendimiento más bajo, entonces se debe realizar una investigación para hacer la mejor estimación posible de la condición de bajo rendimiento de modo que el proyecto siga avanzando. Esta metodología debe contar con el pleno acuerdo de todas las partes involucradas en el proyecto antes de continuar.

Por otro lado, no es raro que las entidades gubernamentales requieran que los sistemas de agua mediante energía solar recién construidos utilicen solo un porcentaje de la cantidad de la prueba de rendimiento. Esto se considera un rendimiento permitido o seguro y comúnmente se mantiene entre el 80% y el 90% de los resultados de la prueba de rendimiento (aunque algunas entidades exigen que se mantenga en un nivel bajo como 60%). Asimismo, como se mencionó anteriormente, si hay otros usuarios de la misma fuente de agua, todas las partes involucradas deben determinar y acordar el porcentaje del rendimiento que puede ser utilizado por el sistema de agua mediante energía solar antes de continuar con el diseño del sistema de agua.

2.3.2. Condiciones de la fuente

Las condiciones adicionales de la fuente de agua tendrán diversos efectos potenciales en el diseño del sistema de agua mediante energía solar.

2.3.2.1. Condiciones del pozo

Si el sistema utiliza agua subterránea a través de un pozo, entonces el tamaño de la tubería de revestimiento (diámetro) del pozo tendrá un efecto directo sobre el tamaño de la bomba y de motor que se podrá seleccionar. Por otro lado, el tipo de revestimiento, la ubicación de la exploración y la profundidad total del pozo será información necesaria para el diseño del sistema.

2.3.2.2. Elevación de la fuente de agua

Una vez completada la prueba de rendimiento en la fuente de agua, se conocerá el nivel de agua estático y el nivel de agua dinámico en la fuente (ver **2.3.1.1. Rendimiento de la fuente de agua de un pozo**). La diferencia en la elevación de estos niveles al tanque de almacenamiento de agua (y a cualquier sistema de tratamiento de agua utilizado) tendrá un efecto directo en el diseño de los componentes del sistema de agua (ver **3.2. Selección de bomba y motor (o selección del conjunto de bomba fotovoltaica)**).

También es importante reconocer que, de manera similar al cambio estacional del rendimiento de la fuente (ver **2.3.1.3. Rendimiento seguro o rendimiento permitido**), los niveles estáticos y dinámicos también pueden cambiar por estaciones. Si este es el caso, es recomendable realizar la prueba de la fuente en la época del año en que los niveles estarán en su nivel más bajo. Si el proyecto en cuestión no puede esperar a que se realice una prueba cuando los niveles estén en su nivel más bajo, entonces se deberá realizar una investigación para realizar la mejor estimación posible de los niveles más bajos con el fin de que el proyecto siga avanzando. Esta metodología debe contar con el acuerdo total de todas las partes involucradas en el proyecto antes de continuar.

2.3.2.3. Calidad del agua

El tratamiento del agua no se aborda de manera específica en esta guía de diseño. Sin embargo, la calidad del agua de la fuente de agua puede aun así influenciar en el diseño del sistema de agua mediante energía solar. El primer efecto potencial es cuando la calidad del agua de la fuente no es apta para consumo humano. Es posible que el agua sea de tan mala calidad que se rechace el uso de la fuente para cualquier proyecto para consumo humano.



Calidad del agua

*La calidad del agua de la fuente probablemente influenciará el
diseño de un sistema de agua mediante energía solar.*



Sin embargo, si se dispone de un sistema de tratamiento que remedie eficazmente los problemas de calidad del agua, entonces este tratamiento deberá incluirse en el diseño general del sistema de agua. Si el medio decidido para el tratamiento del agua es un sistema de tratamiento directo en la línea de suministro, esto requerirá una cierta cantidad de energía de la bomba y el motor, lo cual se debe tener en cuenta en el diseño de la instalación fotovoltaica que suministra energía al motor y la bomba.

La otra consideración de la calidad del agua es cuando la fuente tiene una característica que pudiera resultar corrosiva para la bomba, el motor y/u otros componentes del sistema de transporte de agua. Una cantidad significativa de sólidos suspendidos en la fuente de agua, indicada por una medición de turbidez alta, provocará un desgaste excesivo en algunas bombas e incluso podría inutilizarlas ciertas bombas. Un proyecto que extrae agua de una fuente con alta turbidez debe emplear ya sea algún tipo de proceso de sedimentación previo antes de la bomba o utilizar una bomba diseñada para manejar un flujo de agua con alta turbidez.

Asimismo, el alto contenido de cloruro, la alta conductividad, los altos niveles de TDS y los niveles de pH ácido del agua de la fuente pueden causar la corrosión de ciertos metales, lo cual ocasiona bombas y tuberías dañadas. El agua muy dura puede originar la acumulación de depósitos de carbonato (incrustaciones) y reducción de la capacidad de la tubería. Estas condiciones deben abordarse durante el diseño en caso estén presentes en una fuente de agua. El uso de ciertos materiales o el tratamiento previo del agua puede mitigar las condiciones o también se puede asegurar una fuente de agua alternativa para evitar estas condiciones por completo.

Si el agua del sistema está destinada en última instancia para el consumo humano, se debe realizar un amplio rango de pruebas de la calidad del agua en la fuente de agua. Incluso un sistema de suministro de agua de alta calidad mediante energía solar no será capaz de satisfacer las necesidades de los usuarios finales si la calidad del agua hace el agua sea inutilizable. En este caso, es esencial utilizar un método de tratamiento de agua diseñado para hacer que el agua sea segura para el consumo humano. De hecho, una ventaja clave del bombeo mediante energía solar (o cualquier bombeo mecanizado) en comparación con el bombeo manual es la capacidad de incluir un tratamiento directo en el sistema de suministro de agua.

IEC 62253 (6.2 Datos del cliente) establece que la calidad del agua “debe ser conforme a las regulaciones internacionales o nacionales”.

2.3.2.4. Condiciones geográficas

La distancia desde la fuente de agua hasta el tanque de almacenamiento de agua (y hasta cualquier sistema de tratamiento de agua utilizado) tendrá un efecto directo en los componentes del sistema (ver **2.4. Disposición del diseño del sistema de suministro de agua**). Asimismo, puede haber problemas de seguridad, peligros potenciales y obstáculos de construcción (como obstrucciones existentes de rocas y raíces de árboles en las rutas de las tuberías) que se deben planificar durante la disposición y el diseño del sistema de agua. Estas consideraciones plantearían desafíos en el diseño de cualquier proyecto de agua, pero los proyectos de agua mediante energía solar en particular pueden enfrentar obstáculos adicionales debido a la energía requerida para realizar las adaptaciones adecuadas.

2.4. Disposición del diseño del sistema de suministro de agua

(referencia IEC 62253 – 6.2 Datos del cliente, Condiciones locales a. geográficas, c. específicas)

La disposición del diseño se refiere a la ubicación y organización de todos los componentes del sistema de agua. La disposición del diseño del sistema de suministro de agua incluirá toda la información del sistema de transporte de agua, incluido el recorrido de la tubería, el material de la tubería, el tamaño(s) de la tubería y el grosor de la pared de la tubería (diámetro exterior e interior). La disposición del diseño de un sistema de suministro de agua afectará directamente la selección de la bomba y el motor, así como el diseño de la instalación fotovoltaica y el sistema de suministro de energía. Además, se planificarán y diseñarán todos los cambios de elevación entre cada componente del sistema. Esto incluiría diferencias en la elevación entre el nivel de agua dinámico de la fuente de agua, la elevación del tanque de almacenamiento de agua y la elevación de cualquier tratamiento de agua incluido en el sistema. Si también se requiere una cierta cantidad de presión de agua en el punto de descarga, como en el caso de los aspersores de riego, este punto también deberá tenerse en cuenta. Por otro lado, se deben colocar todas las tuberías para evitar áreas propensas a la erosión por la escorrentía de agua de lluvia.

Todos estos elementos contribuirán a la CDT del sistema de agua, que corresponde a la cantidad de energía requerida de la bomba para que el agua fluya según el caudal del diseño. Con el supuesto de que la energía de presión puede pasarse por alto y la energía cinética es inexistente en el sistema (típico de los proyectos de suministro de agua rural), entonces la CDT es una suma de energía potencial (diferencia de elevación entre el nivel de agua inicial y final), pérdida de carga de fricción (debido a la fricción con la tubería) y pérdidas de carga menores (de los componentes del sistema de tuberías). Esta guía de diseño no presenta los métodos de cálculo de CDT, ya que los métodos de cálculo de CDT para un sistema de bombeo mediante energía solar no son diferentes de los métodos usados en cualquier otro sistema de bombeo mecanizado.

Al comienzo del diseño, la disposición puede ser preliminar y solo se podrá confirmar al final del diseño. Por lo tanto, es común que la disposición del diseño sea un proceso iterativo. La ubicación de los componentes principales y la información de la tubería recomiendan la selección de la bomba y el motor, así como el diseño de la instalación solar. Posteriormente, la bomba, el motor y la instalación solar confirman o revisan la ubicación de los componentes principales y la información de la tubería.

Con respecto a la ubicación de los componentes principales del sistema de agua, esta guía advierte contra el uso de dispositivos pequeños y portátiles de sistemas de posicionamiento geográfico (GPS) para datos de elevación. Por lo general los dispositivos GPS solo son precisos con respecto a la longitud y la latitud, pero no tienen el mismo nivel de precisión en lecturas de elevación. A menos que las especificaciones del fabricante del GPS indiquen que el dispositivo es preciso para lecturas de elevación, no se recomienda este método. Sin embargo, algunos sistemas de medición basados en GPS son precisos al tomar lecturas de elevación. Estos sistemas de medición suelen rastrear las diferencias de elevación entre múltiples puntos en una medición. Cualquier sistema de medición similar que pueda medir diferencias de elevación con una precisión de menos de un metro, y de preferencia menos de medio metro, será adecuado.

Es posible que algunos proyectos no sean apropiados para instalar el sistema de mayor capacidad que el rendimiento de la fuente de agua pueda admitir. Esto podría deberse a una demanda de diseño menor que el rendimiento máximo de la fuente, fondos de capital disponibles limitados u otras restricciones políticas o sociales. La disposición del diseño del sistema para estos proyectos reflejará esta limitación por necesidad. Sin embargo, se debe pensar en la disposición del sistema de suministro de una posible futura expansión (por ejemplo, si hubiera fondos adicionales disponibles en una fecha futura). En este caso, el sistema de tuberías instalado inicialmente debe ser adecuado para un flujo de diseño de menor y mayor capacidad, así como también sería necesario planificar el espacio adecuado para una futura expansión de la instalación solar. Es posible que también se necesite un volumen de almacenamiento de agua adicional en dicha fecha futura.

2.5. Ubicación del proyecto

(referencia IEC 62253 – 6.2 Datos del cliente, datos a. geográficos, b. climáticos)

La ubicación del proyecto afectará directamente el diseño de la instalación fotovoltaica que proporcionará energía al sistema de agua. En general, los paneles solares convierten la energía del sol en energía utilizable. La velocidad a la que la energía solar cae sobre un panel se conoce como irradiancia solar y se mide en unidades de potencia por área (por ejemplo, W/m^2). La intensidad de la irradiación solar depende de varios factores, incluida la ubicación, la época del año, la hora del día, así como las condiciones meteorológicas y atmosféricas. La cantidad de energía que un panel solar puede convertir a partir de la energía solar se conoce como producción fotovoltaica. IEC 62253 también permite un diseño donde no se dan o no se conocen los datos de ubicación específicos. En este caso, el diseño debe seguir los datos predeterminados dados en IEC 62124.

2.5.1. Horas de luz diurna y datos de irradiancia para la ubicación del proyecto

La figura 2.5.1.a muestra cómo cambia la irradiancia solar a lo largo del día. La cantidad real de irradiancia en cada hora (tema que se debate en la siguiente sección) y el número de horas al día cuando hay irradiancia varían ampliamente según la ubicación. La figura 2.5.1.b proporciona una representación gráfica de la cantidad de irradiación en diferentes regiones del mundo.

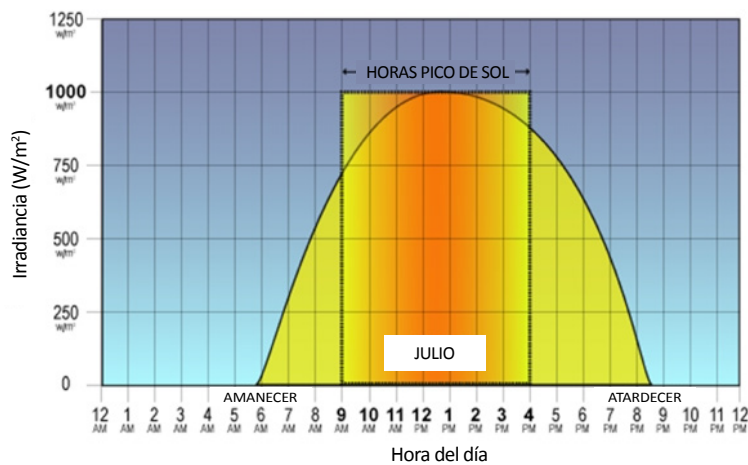


Figura 2.5.1.a: Irradiancia solar basada en la hora del día

Fuente: <http://allbaysolar.blogspot.com/2013/04/peak-hours-vs-sun-hours.ht>

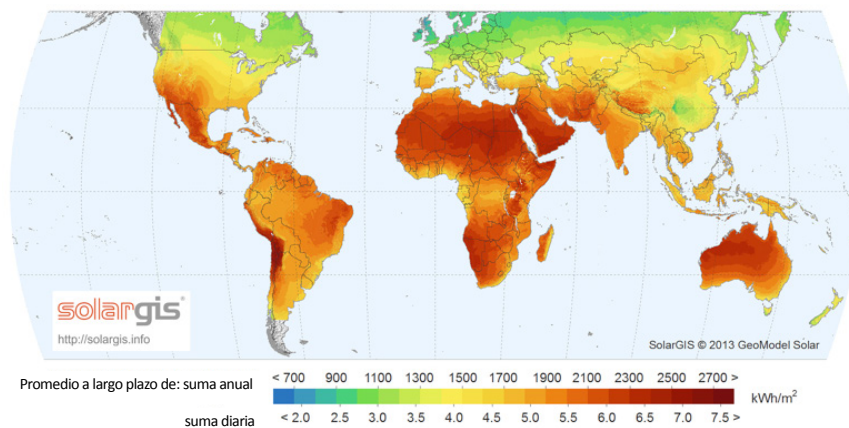


Figura 2.5.1.b: Irradiación solar basada en la ubicación mundial

Fuente: <https://common.s.wikimedia.org/wiki/File:SolarGIS-Solar-map-World-map-en.png>

2.5.2. Datos de temperatura e irradiancia para la ubicación del proyecto

Los dos factores principales que afectan la producción de energía fotovoltaica son la temperatura ambiente y la irradiancia solar. Los aumentos de la temperatura ambiente tienen un impacto negativo en la energía producida por la irradiación. En otras palabras, el aumento de temperatura da como resultado una disminución en la producción de energía. Esto se debe a que el aumento de temperatura provoca una disminución del voltaje, como se muestra en la figura 2.5.2.a Si se entiende que el producto del voltaje por la corriente es igual a la energía, entonces una disminución del voltaje originará una disminución de la energía.

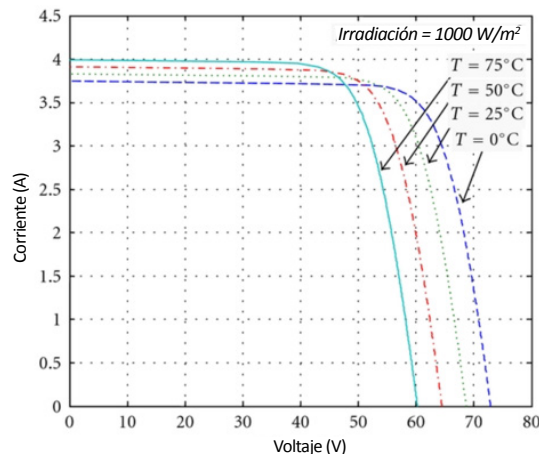


Figura 2.5.2.a: El efecto de la temperatura ambiente en la producción fotovoltaica

El aumento de la irradiancia solar tendrá un impacto positivo en la energía producida por la irradiación. Como se muestra en la Figura 2.5.2.b, el aumento de la irradiancia corresponde con un aumento de la corriente. Si se entiende que el producto del voltaje por la corriente es igual a la energía, entonces un aumento de la corriente resultará en un aumento de la energía. Por tanto, el aumento de la irradiancia solar conduce a un aumento de la producción de energía.

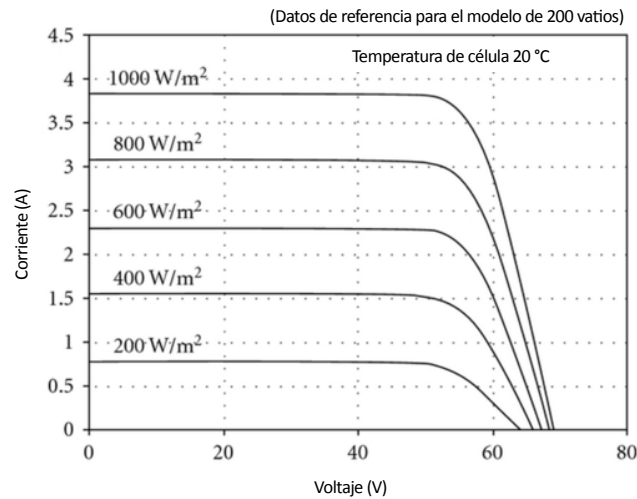


Figura 2.5.2.b: El efecto de la irradiancia solar en la producción fotovoltaica

2.5.3. Datos mensuales de temperatura e irradiancia

La temperatura ambiente y la irradiancia incidente son los únicos factores ambientales necesarios para calcular la producción de un panel solar determinado. Tal como lo muestra **2.5.1. Horas de luz diurna y datos** de irradiancia para la ubicación del proyecto, la irradiancia aumentará a partir de cero al amanecer hasta el máximo diario al mediodía solar y luego disminuirá hasta cero al atardecer. La irradiancia se puede aproximar como una función parabólica con respecto al tiempo si se conocen la irradiación y las horas de luz.

Sin embargo, dado que la posición del sol en el cielo sobre una ubicación determinada cambia a lo largo del año, la irradiancia de dicha ubicación por lo general cambia cada mes. Asimismo, el clima nublado bloqueará la energía del sol, por lo que las estaciones lluviosas generalmente experimentan una irradiación menos intensa. Los datos de temperatura ambiente e irradiancia solar de cualquier lugar del mundo están disponibles en la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) de los Estados Unidos, todos los meses del año (referencia IEC 62253 - 6.2 Datos del cliente, b. datos climáticos, 6.3 Características del sistema). También hay datos similares disponibles en el Sistema de Información Geográfica Fotovoltaica de la Comisión Europea.

Los valores de los datos de temperatura e irradiancia utilizados para diseñar la instalación solar para un proyecto determinado deben basarse en uno de los siguientes grupos de datos mensuales:

- El mes con los valores de irradiancia más bajos
- Cualquier grupo individual de datos mensuales que sea de interés debido a las condiciones de un proyecto o rendimiento deseado.
- El promedio de todos los datos mensuales durante todo el año

Si se confiará en que el sistema de agua mediante energía solar producirá una cantidad determinada de agua durante todos los meses del año, entonces se debe utilizar el mes con el grupo de datos de valor de irradiancia más bajo para el diseño del sistema. Esto se debe a que la instalación solar deberá proporcionar suficiente energía para que la bomba funcione al flujo de diseño durante las peores condiciones de irradiancia. Sin embargo, diseñar un sistema de agua mediante energía solar en las condiciones de irradiancia más bajas, no es necesariamente la “peor condición”, tal como se describe en la sección 6.2.d) de IEC 62253. IEC 62253 también menciona una fecha y una carga de agua para las peores condiciones.

Por ejemplo, la condición de irradiancia más baja puede tener lugar durante la temporada de lluvias. Sin embargo, la demanda de agua durante la temporada de lluvias puede ser menor que durante el resto del año debido a la cosecha con agua de lluvia u otras prácticas de recolección de agua. Por lo tanto, la fecha de las peores condiciones puede ser durante un mes en el que las condiciones de irradiancia son un promedio o están al máximo, pero cuando la demanda de agua es más alta debido a la falta de lluvia. La determinación de este tipo de condición requiere una comprensión profunda de los patrones de uso del agua en una comunidad durante todo un año (para obtener más información, ver **2.2.3. Área de uso del agua de servicio**).

Además, la peor condición para la carga de agua usualmente será durante el mes en el que el nivel del agua del acuífero descienda al mínimo estacional. Sin embargo, es posible que esta condición no corresponda al mes con los valores de irradiancia más bajos. Se requerirán datos hidrogeológicos y pruebas exhaustivas de rendimiento y reducción de nivel del agua (ver **2.3.1. Rendimiento de la fuente**) para determinar el nivel bajo de agua estacional.

La condición que requiere la mayor demanda de flujo y presión de la bomba cuando la energía disponible de la irradiancia solar es baja es la “peor condición”. Si se determina que un mes diferente al que presenta los valores de irradiancia más bajos es el mes con las peores condiciones, entonces es mejor diseñar el sistema utilizando el grupo de datos de temperatura e irradiancia de ese mes específico.

De manera alternativa, si se utiliza el sistema de agua mediante energía solar solo durante una temporada en particular, entonces el sistema debe diseñarse para los grupos de datos mensuales de esa temporada.

Independientemente del mes según el cual esté diseñado el sistema de agua mediante energía solar, es una buena práctica verificar también el diseño utilizando los datos de temperatura e irradiancia mensuales promedio. El rendimiento en condiciones mensuales promedio aumentará la confianza con respecto a la selección de equipos.

También se observa que IEC 62253 permite un diseño donde no se conocen los datos de irradiancia y temperatura de la ubicación específica. En este caso, el diseño debe ajustarse por defecto a los datos dados en IEC 62124 y a una temperatura ambiente promedio de 30 °C.

3. Selección de bomba y motor (o selección del conjunto de bomba fotovoltaica)

3.1. Flujo de diseño

El caudal de diseño del sistema de agua se basa en la demanda de diseño (ver **2.2.6. Demanda diaria de agua del proyecto**). De modo simplificado, el flujo de diseño requerido de la bomba se puede expresar como un volumen total diario dividido entre el número promedio de horas de luz diurna (o pico de sol o irradiancia solar total) donde se ubica el proyecto (ver **2.5.3. Datos mensuales de temperatura e irradiancia**). Sin embargo, esto solo será cierto si se proporciona suficiente energía a la bomba para producir una cantidad específica de agua durante cada hora de luz. En realidad, la cantidad de energía que se proporciona a la bomba mediante el panel solar aumentará a medida que sale el sol y disminuirá a medida que se oculta. Por lo tanto, durante el periodo de tiempo en que sale el sol y a medida que se oculta, es posible que no haya suficiente energía para que la bomba produzca el flujo de diseño completo.

Durante la fase de diseño, existen dos formas de manejar la disparidad en la energía suministrada por la instalación solar y la energía requerida de la bomba para producir al flujo de diseño. La primera opción es asumir que el agua solo se produce durante las horas pico de luz solar. Esta opción es la más conservadora. Si se elige esta opción, el diseñador debe asegurarse de que no se permita encender la bomba hasta que se suministre una cantidad adecuada de energía para iniciar un flujo de agua. Si se permite que una bomba se encienda, pero no se le suministra suficiente energía para mover el agua a través de esta, la bomba se sobrecalentará y eventualmente podría fallar. Por lo general, esta condición se evita mediante el uso adecuado de los controles del fabricante de la bomba (o la configuración adecuada del inversor).

La segunda opción es diseñar la instalación con suficientes paneles solares para poder generar la cantidad necesaria de energía incluso durante las horas del día con menor irradiancia. En este caso, la bomba produciría al menos la cantidad mínima de flujo durante cada hora de luz solar. Sin embargo, esta opción solo resulta práctica cuando se dispone del área y las finanzas necesarias para una instalación solar más grande.

Independientemente de la opción que se elija, siempre se debe verificar el diseño completo del sistema de agua mediante energía solar para garantizar que se cumpla con la demanda de diseño (ver **4.8. Verificación del diseño del sistema para la demanda diaria de agua del proyecto**). También debe tenerse en cuenta que si el rendimiento, o rendimiento permitido, de la fuente de agua es menor que el flujo de diseño, entonces el flujo de diseño debe reducirse para que sea igual o menor que el rendimiento de la fuente.

3.1.1. Suplemento de energía

En esta guía no se incluye el proceso de diseño para suministrar fuentes de energía secundarias a la bomba y al motor, con la excepción de la energía solar directa. Las fuentes de energía secundarias incluirían energía de red de CA, generadores y baterías (incluyendo la energía solar almacenada). Sin embargo, si se van a utilizar formas adicionales de energía, entonces el flujo de diseño de la bomba será diferente del flujo de diseño requerido en un sistema alimentado únicamente por energía solar directa. En lugar de dividir el volumen total entre el número promedio de horas de luz diurna (o irradiancia solar total), el volumen total se dividiría entre el total de horas de energía que se proporcionará a la bomba.

Los modos secundarios de energía también influirán las dimensiones del almacenamiento de agua al mitigar el riesgo de emergencias y variaciones climáticas, así como proporcionar bombeo fuera de horario (ver **5. Almacenamiento de agua**).

3.2. Selección de bomba y motor (o selección del conjunto de bomba fotovoltaica)

3.2.1. Tipos de bombas según la fuente de agua

Identificar la fuente de agua del proyecto es un factor esencial para elegir la bomba adecuada. La sección **2.3. Fuente de agua analiza** las consideraciones de la fuente, pero el primer determinante para la selección de la bomba es si la fuente de agua es agua subterránea o agua superficial.

3.2.1.1. Fuente de agua subterránea

Si la fuente es un pozo (o perforación), normalmente se utilizará una bomba sumergible. La mayoría de las aplicaciones actuales de bombeo solar utilizan bombas sumergibles. Lógicamente, las bombas sumergibles deben instalarse por debajo del nivel del agua, totalmente sumergidas. Si la bomba funciona mientras está expuesta al aire, el aire puede introducirse en la bomba y ocasionar daños significativos. Por lo tanto, la mayoría de las bombas sumergibles tienen sensores de funcionamiento en seco que apagan la bomba si no está completamente sumergida. Se deben seguir las recomendaciones del fabricante con respecto a la profundidad a la que se debe sumergir una bomba dentro de una columna de agua.

También debe reconocerse que la selección de la bomba está limitada por el diámetro interior de la carcasa del pozo. Esto también significa que, si la carcasa se instaló mal o ha sido dañada, cualquier estrechamiento de la carcasa en cualquier punto de la columna del pozo también afectará el tamaño de la bomba adecuada que se debe instalar en el pozo. El diámetro interior de la carcasa del pozo debe cumplir con los requisitos y recomendaciones del fabricante de la bomba. De manera similar, un pozo debe estar verticalmente sondado para acomodar de manera adecuada una instalación de bomba sumergible y de tubería ascendente.

Asimismo, las bombas sumergibles son muy sensibles a las partículas sólidas, por lo que se deben usar principalmente en pozos donde la turbidez es baja. Por lo general, no se recomienda usar bombas sumergibles

Curvas de la bomba

La selección de la bomba depende considerablemente de la demanda del diseño (ver 2.2.6. Demanda del diseño) y el diseño hidráulico.



Foto cortesía de Water Mission

en ríos, lagos turbulentos o áreas propensas a inundaciones, a menos que se proporcionen medios para proteger a la bomba del sedimento y la turbidez alta. Normalmente, un pozo excavado a mano (o un pozo sin protección) también es propenso a la turbidez, el sedimento y los sólidos debido a la construcción del pozo y al agua superficial de escorrentía. Por estas razones, a menos que se pueda facilitar la protección de la bomba, las bombas sumergibles no son recomendables para instalaciones de pozos excavados a mano.

3.2.1.2. Fuente de agua superficial

Si el agua superficial es la mejor fuente de agua disponible, entonces sería más apropiado utilizar una bomba de superficie. El uso de bombas de superficie se recomienda en muchas fuentes de agua, incluyendo ríos, lagos, piscinas y tanques. Sin embargo, las bombas de superficie tienen una altura de succión baja y no pueden extraer agua de fuentes profundas (como un pozo o una perforación profunda) o desde la profundidad de una fuente de agua superficial. Por lo tanto, usualmente se evitan los pozos cuando se usa una bomba de superficie (a menos que se pueda cumplir con el requisito de carga de aspiración positiva neta). También es importante saber que una bomba de superficie por lo general requiere cebado antes de su uso.

Si se utiliza una bomba de superficie, se debe considerar la carga neta positiva de aspiración (CNPA). Cada sistema de agua tendrá una cierta cantidad de CNPA disponible (CNPAD). Para que una bomba de superficie funcione correctamente, la CNPAD debe ser lo suficientemente alta como para evitar la vaporización a medida que el agua ingresa al ojo del impulsor. Cada diseño del impulsor tiene su propio requisito mínimo de CNPA (CNPAR). Si la CNPAD (determinada por el sistema) no es mayor que la CNPAR (determinada por la bomba), el agua se vaporizará cuando ingrese a la bomba. El resultado es la pérdida de carga y eficiencia, cavitación, picaduras y erosión del impulsor y la eventual falla de la bomba (Grundfos, 1999). Esta guía de diseño no presenta los métodos para calcular la CNPAD, ya que los métodos para un sistema de bombeo mediante energía solar y para cualquier otra bomba mecanizada son los mismos. También se debe reconocer que, cuando se usa una fuente de agua superficial, es frecuente que el nivel del agua de la fuente cambie a lo largo del año. Esto deberá tenerse en cuenta dentro de los cálculos de la CNPA para garantizar el correcto funcionamiento de la bomba.

3.2.2. Curvas de bomba

(referencia IEC 62253 - 6.3 Características del sistema)

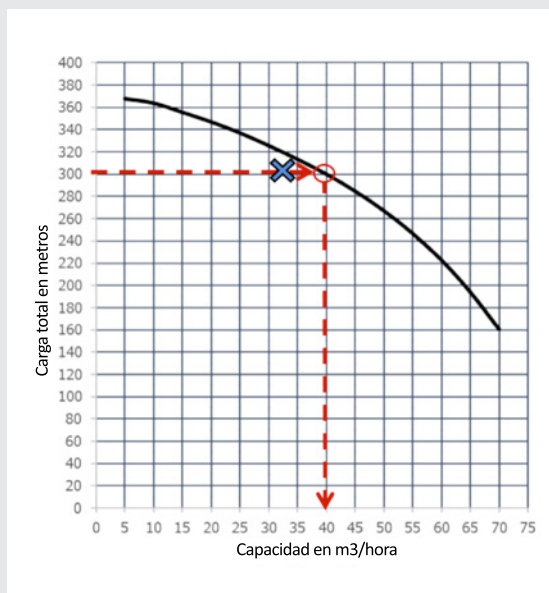
El propósito de las bombas de superficie y sumergibles es agregar energía al agua dentro de un sistema para crear flujo. Por lo tanto, la selección de la bomba depende en gran medida de la demanda de diseño (ver **2.2.6. Demanda diaria de agua del proyecto**) y el diseño hidráulico. En otras palabras, la bomba y el motor se seleccionarán en función del flujo de diseño y la CDT posterior que el sistema de agua exige de la bomba. La presión (o energía por unidad de volumen) que puede suministrar una bomba se conoce como carga de la bomba y se indica como una cantidad de elevación. La cantidad mínima de elevación que debe suministrar una bomba para que un sistema de agua produzca agua es igual a la CDT (ver **2.4. Disposición del diseño del sistema de suministro de agua**).

El flujo de diseño y la CDT del sistema se pueden comparar con modelos de bomba específicos utilizando curvas de rendimiento (o “curvas de bomba”). Una curva de bomba describe la relación entre el flujo y la carga de una bomba. En general, la selección de la bomba requerirá hacer coincidir el caudal del sistema y la CDT requerida con la curva de rendimiento de la bomba. Los fabricantes y proveedores de bombas pueden proporcionar dichas curvas de bomba.

3.2.2.1. Selección de una bomba de CA utilizando curvas de bomba tradicionales

Antes de hablar sobre la selección de bombas solares, presentaremos cómo seleccionar una bomba de CA utilizando una curva de bomba tradicional (nota: el término bomba de CA se usa en este documento para referirse a bombas que solo pueden aceptar energía de CA, en lugar de CC). Esto es importante para la presentación de las bombas solares por dos motivos. En primer lugar, el proceso para leer las curvas de rendimiento de la bomba solar, que muestran el rendimiento bajo cantidades variables de energía, se basa en el método de selección de una bomba con una curva de bomba tradicional. Las curvas de bomba tradicionales asumen una cantidad constante de energía suministrada. En segundo lugar, muchas bombas de CA también pueden funcionar con energía solar mediante el uso de un inversor (ver **3.5.2. Inversores**). Es importante tener en cuenta esto, ya que las bombas alimentadas por CA tienen un mayor rango de rendimiento en comparación con las bombas solares. Algunos diseños de sistemas de agua requerirán este rendimiento mayor.

La energía requerida por una bomba de CA la determina la propia bomba. Por lo tanto, una curva de bomba tradicional muestra solo una curva de CDT versus el caudal a la energía requerida. El primer paso para seleccionar una bomba de CA es encontrar una en la que la CDT diseñada se cruce con la curva de la bomba. El punto donde la CDT diseñada se encuentra con la curva corresponde al caudal potencial en el eje x. Este es el flujo que la bomba puede alcanzar teniendo en cuenta la CDT específica y las condiciones ideales. Este flujo potencial debe ser mayor que el flujo de diseño. Si la bomba no puede producir agua al flujo de diseño (es decir, el flujo potencial es menor que el flujo de diseño), entonces se debe elegir otra bomba. El siguiente ejemplo detalla el proceso de selección de una bomba de CA con una curva de bomba tradicional.



Curva de rendimiento de la bomba de CA

potencial) que corresponde a este punto. Según la curva de rendimiento de la bomba de CA, la bomba puede generar 40 m³/h a una CDT de 300 m.

Paso 3: Asegurarse que el caudal potencial exceda el caudal diseñado.

El paso 2 determinó que el caudal potencial es de 40 m³/h a un CDT de 300 m, lo cual excede el caudal diseñado de 33 m³/h.

Paso 4: Determinar el requerimiento de energía.

Después de seleccionar la bomba, la cantidad de energía necesaria dependerá de los requisitos de la bomba y el motor. Esta información debe estar disponible en las especificaciones del fabricante.

Ejemplo: Selección de una bomba de CA

Selección de una bomba de CA para un sistema diseñado con un caudal de 33 m³/h y una CDT de 300 m.

Paso 1: Encontrar una bomba que pueda lograr la CDT diseñada.

La curva de rendimiento de la bomba indica un rango CDT de aproximadamente 160-370 m. Por lo tanto, la bomba es capaz de la CDT diseñada de 300 m.

Paso 2: Encontrar el caudal potencial de la bomba a la CDT diseñada.

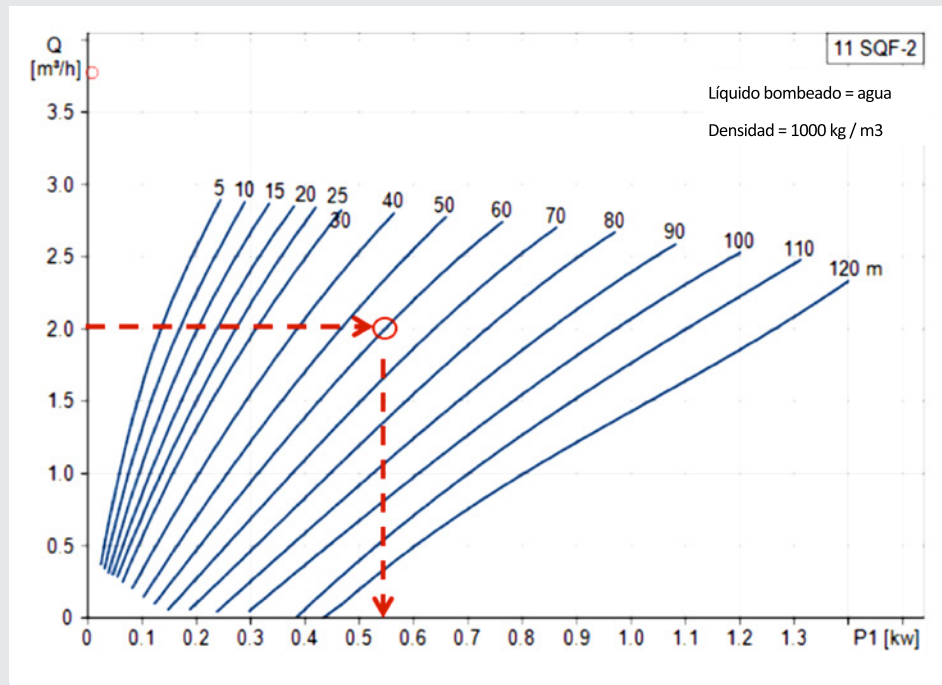
Encontrar el punto en la curva de la bomba que corresponde a un valor CDT de 300 m. Luego, encontrar el valor en el eje x (es decir, el caudal

3.2.2.2. Selección de una bomba utilizando las curvas de rendimiento de la bomba solar

Cada bomba solar tendrá un rango de CDT y condiciones de flujo que es capaz de cumplir en función de la cantidad de energía suministrada. Por lo tanto, una bomba solar tendrá múltiples curvas de rendimiento para cubrir una variedad de condiciones. Los caudales correspondientes se ilustran en el eje y, mientras que la energía requerida se ilustra en el eje x. El primer paso es encontrar una bomba con una capacidad de carga de bomba que abarque el valor calculado para el sistema. En otras palabras, una de las curvas de rendimiento de la bomba corresponderá a la CDT diseñada del sistema. A continuación, el flujo de diseño en el eje y debe cruzarse con dicha curva de rendimiento. El punto del gráfico donde se cruzan el flujo diseñado y la CDT se correlacionará con la energía requerida en el eje x. Este proceso se ilustra en el siguiente ejemplo.

Ejemplo: Selección de una bomba solar

Selección de una bomba solar sumergible para un sistema con un caudal de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ y una CDT de 60 m.



Curva de rendimiento de la bomba solar para la Grundfos 11 SQF-2

Paso 1: Encontrar una bomba que pueda lograr la CDT diseñada del sistema.

Utilizar las curvas de rendimiento para determinar el rango de CDT que puede alcanzar cada modelo de bomba. Según la curva, la Grundfos 11 SQF-2 tiene un rango de CDT de 5-120 m, lo cual incluye el diseño del sistema de 60 m.

Paso 2: Asegurarse que la bomba en cuestión pueda alcanzar el caudal diseñado del sistema.

El eje y del gráfico de la curva de rendimiento muestra los caudales que puede producir. Al observar el gráfico, la 11 SQF-2 puede bombear aproximadamente $0\text{-}3 \text{ m}^3/\text{h}$, lo cual abarca el diseño del sistema de $2 \text{ m}^3/\text{h}$. De manera más específica, la marca de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ se cruza con la curva de rendimiento de 60 m. Esto indica que la Grundfos 11 SQF-2 puede cumplir con el diseño del sistema.

Paso 3: Determinar el requerimiento de energía.

Encontrar el punto en el gráfico donde la marca de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ se cruza con la curva CDT de 60 m. Luego, bajar en línea recta hacia el eje x para determinar el requerimiento de energía. Según el gráfico, la Grundfos 11 SQF-2 requiere aproximadamente 550 W para lograr el diseño del sistema.

Es posible que varios modelos de bombas logren el caudal y la CDT diseñados para el sistema. Si este es el caso, se debe determinar la energía requerida para cada una de las bombas que podrían usarse. Se recomienda luego seleccionar el que tenga la clasificación de eficiencia más alta para el flujo requerido y la CDT o el requisito de energía más bajo.

Si el proyecto que se está diseñando no tiene fondos de capital disponibles para la bomba, el motor y el panel solar de mayor capacidad, es posible instalar un sistema de menor capacidad para el cual se disponga los fondos de capital suficientes. Como se mencionó en **2.4. Disposición del diseño** del sistema de suministro de agua, la recomendación sería instalar un sistema de tuberías que sea adecuado tanto para un flujo de mayor y menor capacidad, así como para asegurar

que haya espacio adecuado para una posible expansión futura de los paneles solares para una bomba de mayor capacidad. Es posible que también se necesite un volumen de almacenamiento de agua adicional.

3.2.2.3. Software de selección de fabricante

Muchos fabricantes líderes de bombas solares ofrecen herramientas informáticas en línea y fuera de línea que se pueden utilizar en el proceso de diseño y selección (por ejemplo, Grundfos, Lorentz y Franklin ofrecen estas herramientas como ayuda durante la selección de sus respectivos productos). Los usuarios ingresan criterios de diseño tales como la demanda de agua, el rendimiento de la fuente de agua, el tipo de fuente de agua, la información del sistema de agua, la ubicación del sitio y las condiciones de irradiancia. Luego, las herramientas proporcionan múltiples configuraciones de equipos que pueden lograr los criterios de diseño que el usuario puede posteriormente evaluar.

En las manos de un usuario capacitado, estas herramientas pueden conducir a una selección efectiva y eficiente de los equipos y del diseño del sistema. Sin embargo, sin datos de diseño precisos y sin el conocimiento adecuado de los principios subyacentes, las herramientas pueden terminar en equipos de tamaño inadecuado. El usuario debe comprender los ingresos de criterios de diseño para utilizar las herramientas con precisión. Las herramientas de selección patentadas no pueden evaluar la idoneidad de ciertas selecciones de equipos más allá de los criterios ingresados o de las ofertas de productos del fabricante. El usuario debe poder proporcionar esta evaluación. El ingeniero responsable debe también asegurarse que el diseño cumpla con los requisitos de IEC 62253.

3.3. Energía requerida

Es fundamental suministrar la cantidad correcta de energía (potencia) para que la bomba (y el inversor, si corresponde) funcione con el flujo de diseño y los requisitos de CDT.

3.3.1. Energía requerida por el motor de la bomba

La energía que la bomba pueda agregar al agua dependerá de la energía suministrada al motor de la bomba. La energía requerida por un motor de bomba se puede identificar rápidamente mediante la curva de la bomba proporcionada por el fabricante y la información adjunta.

3.3.2. Energía requerida por el inversor

Si se está utilizando un inversor (ver 3.5.2. Inversores), es importante reconocer que el inversor también tendrá ineficiencias. Por lo tanto, la entrada de energía que requiere el inversor será mayor que la energía del motor (ver 4.1.3. Pérdidas de energía).

3.4. Especificaciones del fabricante

3.4.1. Con respecto al motor

Después de identificar la potencia del motor, es importante identificar también el rango de voltaje de entrada y el consumo máximo de corriente del motor. El voltaje suministrado por la instalación solar deberá exceder el voltaje mínimo requerido por el motor de la bomba o, de lo contrario, la bomba no arrancará. Por otro lado, el voltaje de la instalación solar no debe exceder el voltaje máximo aceptable para el motor de la bomba o dañará el motor. La mayoría de los motores de bombas están equipados con protección contra sobretensión (y subtensión), lo cual significa que el motor y la bomba se apagarán automáticamente si el voltaje suministrado está fuera del rango aceptado.

Con respecto a la corriente, el motor de la bomba solo consumirá un cierto número de amperios identificado en las especificaciones del motor de la bomba. Si la instalación solar suministra una corriente mayor que el consumo máximo de amperaje del motor de la bomba, entonces la potencia real que utiliza el motor se basará en el amperaje máximo del motor y no en el amperaje suministrado por la instalación solar.

3.4.2. Con respecto al inversor

Si se utiliza un inversor, el inversor en sí deberá tener un rango de voltaje de entrada aceptable (VCC). El inversor no funcionará si el voltaje que suministra la instalación solar no se encuentra dentro del rango de voltaje aceptable para el inversor.

En cuanto a la corriente, un inversor solo podrá suministrar una cierta cantidad de amperios al motor de la bomba. Si la instalación solar suministra un amperaje al inversor que excede la cantidad que el inversor suministrará al motor de la bomba, la potencia utilizable se basará en el amperaje máximo que el inversor pueda suministrar al motor de la bomba y no en el amperaje suministrado por la instalación solar.

El diseño y uso de un inversor deben cumplir con IEC 62109-1 e IEC 62109-2.

3.5. Equipo auxiliar de bomba y motor

Se deben identificar todos los equipos auxiliares necesarios para que la bomba y el motor funcionen correctamente según la marca y el modelo de la bomba



Equipo auxiliar de bomba y motor

Es fundamental en la selección de todos los equipos auxiliares que las piezas del equipo estén clasificadas para la forma de energía que transmitirán.



y el motor. Estos pueden incluir, entre otros, unidades de control, inversores, interruptores o cajas de interruptores, interruptores de flotador y sensores/interruptores de funcionamiento en seco. Durante la selección de todos los equipos auxiliares, es fundamental que las piezas del equipo estén clasificadas para la forma de energía que transportarán (es decir, el equipo utilizado para transportar energía de CC debe estar clasificado para CC, así como el equipo utilizado para transportar energía de CA debe estar clasificado para CA).

El diseño y uso de un inversor u otra unidad de acondicionamiento de energía debe cumplir con IEC 62109-1 e IEC 62109-2.

3.5.1. Unidades de control

Algunos fabricantes de bombas han recomendado unidades de control que acompañan ciertos modelos de bombas. Por lo general, se recomiendan para el control adecuado de la bomba y el motor.

3.5.2. Inversores

Un inversor convierte la salida de CC de los paneles solares en CA. Por lo tanto, la mayoría de las bombas de CA pueden funcionar con un panel solar, si se usa el inversor correcto. Por lo general, los inversores se utilizan en un sistema de agua mediante energía solar cuando la capacidad que se necesita de la bomba excede la capacidad de las combinaciones de bomba y motor (o conjuntos de bombas fotovoltaicas) que pueden recibir una entrada de CC. Las combinaciones de bomba y motor que requieren entrada de CA suelen tener capacidades mucho mayores.

Se debe seleccionar el inversor apropiado para alimentar la bomba requerida para el proyecto. Los parámetros fundamentales para determinar la compatibilidad y la capacidad de un inversor para alimentar una bomba específica son:

- clasificación de energía nominal del inversor (kW CA),
- fase de salida del inversor,
- voltaje de salida del inversor (voltios CA),
- corriente de salida máxima del inversor (amperios de CA),
- voltaje de entrada mínimo del inversor (VCC) y
- voltaje máximo de entrada del inversor (VCC).

Si estos valores entran en conflicto con aquellos de la bomba seleccionada, entonces el inversor no es compatible con la bomba. Por lo general, el proceso de recopilación de información y toma de decisiones puede acelerarse mediante el uso de un inversor recomendado por el fabricante de la bomba para la bomba específica que se necesitará para el proyecto. Una vez que se ha seleccionado el inversor, se necesitará contar con el voltaje de CC de entrada mínimo y máximo aceptable para el inversor durante el diseño de la instalación solar (ver **4. Diseño de sistema FV**).

3.5.3. Interruptores de flotador

Los interruptores de flotador se utilizan para encender o apagar una bomba según el nivel del agua en un tanque de almacenamiento. Para los tanques de almacenamiento de agua que se encuentran después de la bomba, el interruptor de flotador se instala de modo que apague la bomba cuando el tanque esté lleno. Por lo tanto, el interruptor de flotador se instala de modo que flote horizontalmente sobre la superficie del agua cuando el tanque esté lleno. En la posición horizontal, un contacto eléctrico se cierra dentro del flotador, el cual envía una señal a la unidad de control de la bomba. Esta señal apaga la bomba. A medida que el agua sale del tanque, el nivel del agua baja y el flotador cambia hacia una posición vertical. Esto reabre el contacto y reanuda el funcionamiento de la bomba hasta que se vuelva a llenar el tanque.

También hay interruptores de flotador disponibles que se pueden usar para drenar tanques. Estos interruptores de flotador encienden la bomba cuando el tanque está lleno y luego apagan la bomba una vez que el tanque alcanza un punto bajo establecido (sin permitir que la bomba funcione en una condición seca). Por lo general, se utilizan en sistemas de agua donde es necesario almacenar agua antes de utilizar la bomba.

También se debe tener en cuenta que todo el cableado del interruptor de flotador tendrá una distancia máxima que se puede acomodar entre el interruptor y la unidad de control de la bomba. Los interruptores de flotador suelen estar disponibles para cualquier sistema de bomba mecanizado. Estos presentan muchas ventajas especialmente en un sistema de energía solar que utiliza toda la potencia del sol del mediodía para bombear agua y llenar los tanques de almacenamiento que se drenarán durante la hora del día en que el sol se pone (ver **5. Almacenamiento de agua**).

3.5.4. Sensores/interruptores de funcionamiento en seco

Un sensor o interruptor de funcionamiento en seco es un accesorio que evita que la bomba funcione cuando no hay agua. Operar una bomba en condiciones secas aumenta el calor y la fricción dentro de la bomba, lo cual puede causar daños y posibles fallas en la bomba. Por otro lado, operar una bomba en seco dentro de un pozo puede causar contaminación biológica dentro de la fuente de agua. Por lo tanto, el uso de protección contra el funcionamiento en seco es fundamental para el éxito continuo de cualquier sistema de agua que utilice una bomba mecanizada, incluidos los sistemas que funcionan mediante energía solar.

Algunas bombas vienen equipadas con un sensor incrustado en el cable del motor que transmite señales directamente a la unidad de control de la bomba para que apague la bomba cuando el sensor está expuesto al aire y no al agua. Si una bomba no viene equipada, por lo general el sensor de funcionamiento en seco se puede suministrar como un equipo auxiliar del equipo. El sensor normalmente se coloca aproximadamente a 0.5 m por encima de la bomba.

3.6. Diseño de instalación de bomba y motor

Se deben determinar los requisitos de ubicación e instalación de la bomba y el motor durante el diseño. Estos incluyen, entre otros: ubicación de la bomba en relación al nivel del agua (o nivel dinámico del agua); requerimientos netos de carga de aspiración positiva de la bomba (si se utiliza una bomba de superficie); requerimientos de cableado (incluida la conexión a tierra); cualquier requerimiento de cebado de la bomba y cualquier requerimiento relacionado con la instalación de equipos auxiliares.

Asimismo, el diseño de la instalación debe proporcionar una protección adecuada a la bomba y al motor con el fin de garantizar un buen rendimiento durante la vida útil esperada. Como tal, se deben diseñar medidas para proteger a la bomba y al motor de peligros ambientales, animales o humanos. Estos incluyen, entre otros, la exposición prolongada a la luz solar directa, cualquier posibilidad de impactos negativos en la calidad del agua que se bombea, la exposición a eventos climáticos peligrosos usuales en el lugar, así como la manipulación o vandalismo por parte de animales o humanos. En el caso de una bomba sumergible en un pozo, la protección adecuada consta de un pozo debidamente enluchado y revestido que tenga una tapa de pozo de alta calidad con sello sanitario. Para las instalaciones de bombas que utilizan fuentes de agua superficial, la protección adecuada incluye una entrada debidamente filtrada de acuerdo con los requerimientos del fabricante de la bomba.

En el caso de las bombas sumergibles instaladas en pozos, el diseño de la instalación también debe incluir una línea de seguridad, así como los medios para retirar la bomba para su mantenimiento futuro. Se recomienda utilizar una cuerda de polipropileno o un cable trenzado de acero inoxidable como línea de seguridad.

4. Diseño de sistema FV

4.1. Diseño de instalación solar

La configuración seleccionada del panel solar y la instalación solar debe suministrar la energía que requieren la bomba y el motor seleccionados, o el inversor, si corresponde (ver **3.3. Energía requerida**), y debe satisfacer todas las especificaciones del fabricante de la bomba y el motor (ver **3.4. Especificaciones del fabricante**). Por lo tanto, se debe estimar la energía que debe suministrar una instalación para verificar si el diseño de la instalación es adecuado para la bomba y el motor requeridos para el sistema de agua. La estimación de la salida de potencia de un diseño de instalación solar implica:

- calcular la salida de potencia de los paneles solares que se utilizarán para las condiciones de irradiancia y temperatura ambiente de la ubicación del proyecto (ver **4.1.1. Selección de panel solar**);
- calcular la salida de potencia de la instalación debido a la configuración de los paneles (ver **4.1.2. Configuración de una instalación solar**);
- y luego ajustar la salida de potencia calculada para la instalación en función de las pérdidas de potencia del sistema (ver **4.1.3. Pérdidas de energía**).

La totalidad del diseño y de la instalación de la instalación solar deben cumplir con los requisitos de diseño IEC 62548 para instalaciones fotovoltaicas (FV).



Diseño de instalación de la bomba y el motor

Selección del panel solar



Fotos cortesía de UNICEF (superior) y Water Mission (inferior)

4.1.1. Selección de panel solar

La cantidad de energía que puedan convertir los paneles solares dependerá de su diseño y especificaciones. Los paneles solares tienen varias características que son importantes para poder estimar su salida de energía. Estas características se proporcionan en las especificaciones y en las fichas técnicas del panel solar por parte del fabricante (aunque la información proporcionada y la terminología pueden diferir según el fabricante).

El punto de máxima potencia (P_{max}) es la máxima salida de vataje posible del panel (diversos fabricantes también pueden denominarlo como potencia pico o nominal).

El voltaje del punto de máxima potencia (V_{mpp}) es el voltaje que corresponde al punto de máxima potencia.

La corriente del punto de máxima potencia (I_{mpp}) es la corriente que corresponde al punto de máxima potencia.

El voltaje de circuito abierto (V_{oc}) es el voltaje que se produce cuando no hay carga en la instalación.

La corriente de cortocircuito (I_{sc}) es la corriente máxima que el panel solar puede manejar en condiciones de cortocircuito.

El coeficiente de temperatura ($TC V_{oc}$) se utiliza para estimar el voltaje de circuito abierto de un panel solar a medida que aumenta la temperatura de la célula. El $TC V_{oc}$ se mide en $V/^{\circ}C$.

La temperatura normal de funcionamiento de la célula (NOCT) es la temperatura de funcionamiento esperada de una célula medida a una irradiancia de 800 W/m^2 y una temperatura ambiente de $20^{\circ}C$.

Los valores de estas características variarán según cada modelo de panel solar. Todos los paneles solares utilizados en una instalación deben tener las mismas características (para consultar la información sobre el efecto de conectar paneles solares de diferente voltaje y/o clasificación de corriente, ver **4.1.2. Configuración de una instalación solar**). Asimismo, es una ventaja para la construcción de la instalación, que los paneles solares sean de la misma longitud y ancho.

El punto de máxima potencia, el voltaje del punto de máxima potencia, la corriente del punto de máxima potencia, el voltaje de circuito abierto, la corriente de cortocircuito y el coeficiente de temperatura son las características principales de los paneles y son proporcionadas por los fabricantes en condiciones de prueba estándar (STC) de 1.000 W/m^2 , masa de aire de 1.5 y temperatura de celda de $25^{\circ}C$. Sin embargo, estas condiciones estándar rara vez, o nunca, ocurren en la realidad. Por lo tanto, la mayoría de los paneles solares no generarán el vataje nominal máximo cuando se instalen en el campo.

El cálculo del rendimiento estimado de un panel solar en condiciones de campo se presenta en **4.1.1.1. Cálculo del rendimiento estimado de un panel según la ubicación del proyecto**. Cualquier panel solar seleccionado debe cumplir con las Normas Internacionales IEC:

- IEC 61215-1 Módulos fotovoltaicos (FV) para uso terrestre. Calificación del diseño y aprobación de tipo. Parte 1: Requisitos de prueba.
- IEC 61215-1-1 Módulos fotovoltaicos (FV) para uso terrestre. Calificación del diseño y aprobación de tipo. Parte 1-1: Requisitos especiales de prueba para los módulos fotovoltaicos (FV) de silicio cristalino.
- IEC 61215-1-2 Módulos fotovoltaicos (FV) para uso terrestre. Calificación del diseño y aprobación de tipo. Parte 1-2: Requisitos especiales de prueba para los módulos fotovoltaicos (FV) de lámina delgada de telururo de cadmio (CdTe).
- IEC 61215-1-3 Módulos fotovoltaicos (FV) para uso terrestre. Calificación del diseño y aprobación de tipo. Parte 1-3: Requisitos especiales de prueba para los módulos fotovoltaicos (FV) de lámina delgada basados en silicio amorfo.
- IEC 61215-1-4 Módulos fotovoltaicos (FV) para uso terrestre. Calificación del diseño y aprobación de tipo. Parte 1-4: Requisitos especiales de prueba para los módulos fotovoltaicos (FV) de lámina delgada basados en Cu (In, GA) (S, Se)₂.
- IEC 61215-2 Módulos fotovoltaicos (FV) para uso terrestre. Calificación del diseño y aprobación de tipo. Parte 2: Procedimientos de prueba.

4.1.1.1. Cálculo del rendimiento estimado de un panel según la ubicación del proyecto

(referencia IEC 62253 - 6.3 Características del sistema)

La salida de potencia (vataje) estimada del panel solar se calculará según la temperatura ambiente y la irradiancia solar de la ubicación del proyecto (ver 2.5.3. Datos mensuales de temperatura e irradiancia para determinar qué conjunto de datos de temperatura ambiente e irradiancia mensual se deben usar para estos cálculos).

Como se mencionó anteriormente, las especificaciones del panel solar se proporcionan en condiciones de prueba estándar. Sin embargo, estas condiciones son inusuales en campo. Por lo general, la irradiancia aumenta desde cero al amanecer hasta el máximo diario al mediodía solar y luego disminuye hasta cero al atardecer. La temperatura también fluctúa durante el día. Debido a estas variaciones en la temperatura ambiente y la irradiancia, los paneles solares normalmente no funcionan según sus especificaciones STC. La salida real de un panel solar determinado se puede calcular si se conocen la temperatura ambiente y la irradiancia. Para calcular la salida de potencia (vataje) de un panel solar, se deben seguir los pasos a continuación.

Paso 1: Calcular la temperatura de la célula. Esta es la temperatura de las células del panel solar como una función de la irradiancia y la temperatura ambiente en la ubicación específica del proyecto.

$$\text{Temp. de célula (}^{\circ}\text{C)} = \text{Temp. ambiente (}^{\circ}\text{C)} + (\text{NOCT} - 20^{\circ}\text{C}) \times \frac{\text{Irradiancia (} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{)}}{800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

Paso 2: Calcular el voltaje de circuito abierto a la temperatura de la célula. El voltaje de circuito abierto varía como una función de la temperatura de la célula de acuerdo con el valor de TC Voc.

$$V_{oc} = \text{STC } V_{oc} + (\text{Temp. de célula} - 25^{\circ}\text{C}) \times \text{STC } V_{oc} \times \text{TC } V_{oc}$$

Paso 3: Calcular la corriente de cortocircuito a la irradiancia incidente determinada. Esto modifica la corriente de cortocircuito estándar para la irradiancia real en la ubicación del proyecto.

$$I_{sc} = \text{STC } I_{sc} \times \frac{\text{Irradiancia (} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{)}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

Paso 4: Calcular la corriente del punto de máxima potencia a la irradiancia determinada. Esto modifica la corriente del punto de máxima potencia estándar para la irradiancia real en la ubicación del proyecto.

$$I_{mpp} = \text{STC } I_{mpp} \times \frac{\text{Irradiancia (} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{)}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

Paso 5: Calcular la salida del panel solar bajo las condiciones determinadas. Esto modifica el punto de máxima potencia estándar para la temperatura ambiente e irradiancia real experimentada en la ubicación del proyecto.

$$P_{max} (W) = V_{oc} \times I_{sc} \times \frac{\text{STC } I_{mpp} \times \text{STC } V_{mpp}}{\text{STC } I_{sc} \times \text{STC } V_{oc}}$$

Paso 6: Calcular el voltaje del punto de máxima potencia del panel. Esto modifica el voltaje del punto de máxima potencia estándar para la temperatura ambiente e irradiancia real experimentada en la ubicación del proyecto.

$$V_{mpp} = \frac{P_{max}}{I_{mpp}}$$

IEC 62253 - 6.3. *Características del sistema*, requiere que se evalúe la potencia de salida de la instalación solar para un mínimo de cuatro conjuntos de datos diferentes de condiciones de temperatura e irradiancia para la ubicación del proyecto, específicamente 100%, 80%, 60% y 40% de las condiciones de máxima potencia. Esto significa que se deben trabajar los cálculos anteriores para evaluar un rendimiento de salida de potencia de un panel solar individual para estas cuatro condiciones como mínimo.

4.1.2. Configuración de una instalación solar

Un panel solar tendrá una producción fotovoltaica limitada según su diseño. En la mayoría de las situaciones, un solo panel no proporcionará suficiente energía para un proyecto de agua. Por lo tanto, varios paneles se conectan en una instalación para aumentar la salida de potencia (vataje) general.

La potencia se puede incrementar de dos formas: mediante un aumento de voltaje o mediante un aumento de corriente. La configuración del cableado de la instalación solar tiene un impacto directo sobre si aumenta el voltaje o la corriente. Hay dos configuraciones de cableado posibles, en serie o en paralelo, las cuales se ilustran en la figura 4.1.2. a continuación.

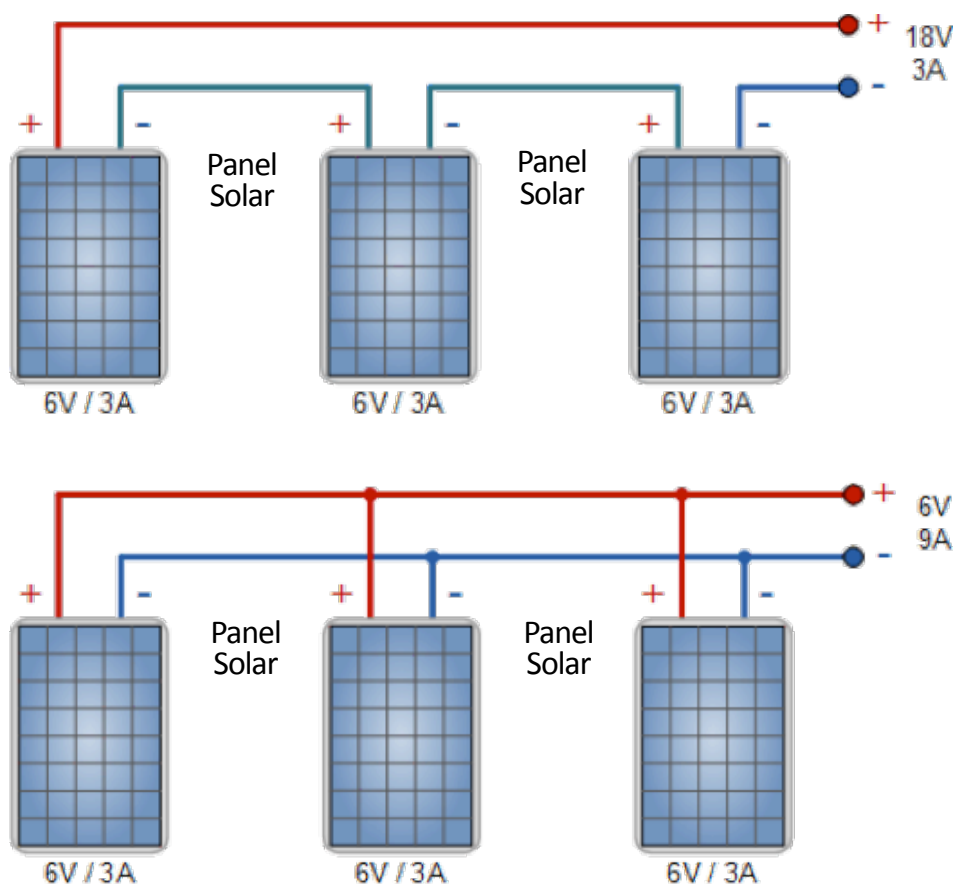


Figura 4.1.2. Comparación de paneles solares cableados en serie (superior) y en paralelo (inferior)

El cableado de los paneles solares en serie aumenta el voltaje, mientras que la corriente permanece igual. Si se conecta en serie, el voltaje total (VT) de la instalación será la suma del voltaje individual de cada panel (Vi). Esto está representado por la siguiente ecuación, donde n es el número total de paneles.

$$V_T = n \times V_i$$

Esta ecuación solo es válida si todos los paneles tienen el mismo voltaje. También es posible utilizar paneles con diferentes voltajes, pero los paneles cableados en serie deberán tener la misma corriente (AET, 2017). Si los paneles no tienen la misma corriente, la instalación estará limitada al valor de corriente más bajo de los paneles individuales.

De manera alternativa, cablear los paneles en paralelo aumenta la corriente, en lugar del voltaje. En paralelo, la corriente total (IT) para una instalación solar será igual a la suma de la corriente individual de cada panel (Ii), tal como se representa en la siguiente ecuación, donde n es el número total de paneles.

$$I_T = n \times I_i$$

Esta ecuación solo es válida si todos los paneles tienen la misma corriente. También es posible cablear paneles con diferentes corrientes juntos en paralelo. Sin embargo, si los paneles no tienen el mismo voltaje, la instalación estará limitada por el valor de voltaje más bajo de los paneles individuales.

Si bien una instalación solar se define como un grupo de paneles solares conectados en serie o en paralelo, por lo general los paneles se conectan entre sí para aumentar el voltaje y lograr el vataje máximo con el menor número de paneles solares. Sin embargo, se debe tener en cuenta que una instalación solar también puede constar de múltiples cadenas de paneles solares. Cada cadena está compuesta por varios paneles solares conectados en serie y cada cadena está conectada en paralelo. El uso de múltiples cadenas es común para motores de bombas que requieren una gran potencia.

Se puede usar la salida conocida de los paneles solares individuales y la configuración de la instalación para calcular la salida de la instalación solar mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Instalación } V_{oc} = V_{oc} \text{ por panel} \times \text{número de paneles en serie}$$

$$\text{Instalación } V_{mpp} = V_{mpp} \text{ por panel} \times \text{número de paneles en serie}$$

$$\text{Instalación } I_{mpp} = I_{mpp} \text{ por panel} \times \text{número de cadenas paralelas}$$

$$\text{Instalación } P_{max} \times (W) = \text{Instalación } I_{mpp} \times \text{Instalación } V_{mpp}$$

Es importante tener en cuenta que el V_{oc} por panel, V_{mpp} por panel e I_{mpp} por panel que se han utilizado en las ecuaciones anteriores deben ser los valores modificados a las condiciones de temperatura e irradiancia según la ubicación y no los valores de STC extraídos de las especificaciones del fabricante del panel solar. La modificación de estos valores para las condiciones de temperatura e irradiancia se detalla en **4.1.1.1. Cálculo del rendimiento estimado de un panel según la ubicación del proyecto.**

La potencia (vataje) de salida total de una instalación solar se debe calcular para un rango de temperaturas ambiente e irradiancias para confirmar que la instalación podrá satisfacer las necesidades del proyecto en una variedad de condiciones. Específicamente, deben evaluarse los datos mensuales de temperatura e irradiancia que el diseñador ha decidido que son la “peor condición” para confirmar que la bomba y la instalación seleccionadas entregarán una cantidad aceptable de agua en dichas condiciones (ver **2.5.3. Datos mensuales de temperatura e irradiancia**).

IEC 62253 - 6.3 Características del sistema, requiere que se evalúe la potencia de salida de la instalación solar para un mínimo de cuatro conjuntos de datos diferentes de condiciones de temperatura e irradiancia para la ubicación del proyecto, específicamente 100%, 80%, 60% y 40% de las condiciones de máxima potencia.

4.1.3. Pérdidas de energía

(referencia IEC 62548)

Asimismo, es importante considerar las pérdidas de energía del sistema durante la evaluación de la instalación solar. Se debe aplicar un factor de reducción a una salida de potencia estimada de la instalación para tomar en consideración cualquier posible fuente de pérdida de energía en el sistema.

Las pérdidas del sistema ocurren por muchos motivos:

Clasificación de la placa: No todos los paneles solares están clasificados con precisión, lo cual significa que la medición real de las características eléctricas de un panel individual podría variar de lo indicado en clasificación de la placa. El verdadero rendimiento de un panel individual puede ser más bajo, y en ocasiones incluso más alto, que la clasificación del panel. El factor de reducción para esta



Pérdidas de energía

Al evaluar la instalación solar, es importante considerar pérdidas de energía del sistema. Se deberá aplicar un factor de reducción a una salida de energía estimada de la instalación para considerar cualquier fuente esperada de pérdida de energía en el sistema.



consideración tiene un rango aceptado de 0.80 a 1.05. Si no está disponible la información específica del panel, el valor recomendado es 0.99.

Disparidad: Las imperfecciones de fabricación entre paneles (o módulos) individuales en una instalación pueden causar ligeras diferencias en las características de corriente y voltaje de los paneles. El factor de reducción para esta consideración tiene un rango aceptado de 0.97 a 1.0. Si no está disponible la información específica del panel, el valor recomendado es 0.98.

Conexiones: Los conectores que se utilizan en un sistema tienen pérdidas resistivas. El factor de reducción para esta consideración tiene un rango aceptado de 0.99 a 0.997. Si no está disponible la información específica del conector, el valor recomendado es 0.995.

Cableado: El cableado que se utiliza para la instalación también tiene pérdidas resistivas. El factor de reducción para esta consideración tiene un rango aceptado de 0.97 a 0.99. Si no está disponible la información específica del cable, el valor recomendado es 0.98 (ver **4.3.1. De paneles solares a la bomba** para consultar sobre la caída de voltaje a través del cableado).

Suciedad: Cualquier acumulación de tierra y escombros en la superficie de los paneles solares puede evitar que la radiación solar llegue a las células del panel y provocar una disminución en la generación de energía. Esta acumulación depende de las condiciones de la ubicación de la instalación y el régimen de mantenimiento, así como de los patrones climáticos locales. Las áreas de alto tráfico y alta contaminación experimentan el mayor potencial de pérdidas por suciedad. La frecuencia de la lluvia y el lavado de los paneles influyen en el impacto de la suciedad con respecto a la generación de energía. Para fines de diseño, el valor del factor de reducción recomendado es 0.98 con una planificación y mantenimiento responsables.

Disponibilidad del sistema: Las paradas programados y no programados del sistema (es decir, mantenimiento o interrupciones) causan una reducción en la salida de energía del sistema. Para fines de diseño, el valor del factor de reducción recomendado es 0.97.

Sombras: Cuando los árboles, edificios u otras obstrucciones cercanas crean sombras en la superficie de los paneles de la instalación, la potencia de salida de la instalación será inferior a su capacidad total. Por lo tanto, se deben tomar todas las medidas posibles para garantizar que no se experimenten sombras en ningún momento del año en el que se espere que la instalación produzca energía (ver **4.6. Ubicación de la instalación solar**). También se debe tener en cuenta que, si una instalación está dispuesta en varias filas de paneles, es importante que las mismas filas individuales no creen sombras en los paneles. Asimismo, a medida que crece la vegetación circundante, una parte del mantenimiento de la instalación solar debe incluir el manejo de este crecimiento para evitar futuras sombras. Para fines de diseño, el valor del factor de reducción recomendado es 0.97.

Antigüedad: El desgaste de los paneles solares eventualmente afectará el rendimiento de la instalación. No es necesario utilizar un factor de reducción para esta consideración, a menos que se usen paneles ya antiguos para construir la instalación (lo cual no se recomienda en esta guía).

Degradación inducida por la luz: Durante los primeros meses de funcionamiento, algunos paneles solares experimentan una reducción en el rendimiento debido a la degradación inducida por la luz. Para fines de diseño, el valor del factor de reducción recomendado para esta consideración es 0.985.

Pérdidas del inversor: Si el sistema solar utiliza un inversor (ver **3.3.2. Energía requerida por el inversor**), entonces también se deberá tener en cuenta la eficiencia del inversor. Si no se dispone de información específica sobre la eficiencia del inversor, entonces el valor del factor de reducción recomendado para esta consideración es 0.96.

Si juntamos todas las posibles pérdidas de potencia, la recomendación de esta guía es aplicar un factor de reducción general entre 0.85 y 0.90 para un sistema sin inversor o entre 0.82 y 0.85 para un sistema con inversor.

$$P_{\text{reducido}} (W) \text{ de la instalación} = P_{\text{max}} (W) \text{ de la instalación} \times \text{factor de reducción}$$

4.1.4. Verificación de vataje suministrado

La estimación final calculada de la potencia (vataje) de la instalación solar suministrada al motor de la bomba debe cumplir con la energía requerida por el motor de la bomba (y/o el inversor, si corresponde) para que la bomba funcione según las condiciones de diseño del caudal y CDT. Asimismo, es importante recordar que la irradiancia varía a lo largo del día (ver **2.5. Ubicación del proyecto**). Esto significa que la cantidad de energía que la instalación solar suministra a la bomba cambiará a lo largo del día.

Si los cálculos anteriores para la instalación no proporcionan suficiente energía a la bomba y al motor durante un periodo de tiempo suficiente cada día para producir la cantidad deseada de agua del sistema, entonces será necesario rediseñar la instalación FV.

4.1.5. Verificación de voltaje y amperaje suministrados

El voltaje suministrado por la instalación solar deberá exceder el voltaje mínimo requerido por el motor de la bomba o, de lo contrario, la bomba no arrancará. Asimismo, el Voc calculado de la instalación solar debe ser menor que el voltaje máximo aceptado por el motor de la bomba. La mayoría de los motores de bombas están equipados con protección contra sobretensión (y subtensión), lo cual significa que el motor y la bomba se apagarán si el voltaje suministrado está fuera del rango aceptado.

Con respecto a la corriente, el motor de la bomba solo consumirá un cierto amperaje identificado en las especificaciones del motor de la bomba. Si la instalación solar suministra una corriente mayor que el consumo máximo de amperaje del motor de la bomba, entonces el vataje real que utiliza el motor se basará en el consumo máximo de amperaje del motor y no en el amperaje suministrado por la instalación solar.

Por otro lado, si se utiliza un inversor, el propio inversor también tendrá un rango de voltaje de entrada aceptable para el inversor. El inversor no funcionará si el voltaje que suministra la instalación solar no se encuentra dentro del rango de voltaje aceptable para el inversor.

En cuanto a la corriente, un inversor solo podrá suministrar un cierto amperaje al motor de la bomba. Si la instalación solar suministra un amperaje al inversor que excede la cantidad que el inversor suministrará al motor de la bomba, el vataje utilizable se basará en el amperaje máximo que el inversor pueda suministrar al motor de la bomba y no en el amperaje suministrado por la instalación solar.

4.2. Requerimientos adicionales de instalación

4.2.1. Ángulo de inclinación de la instalación solar

Los paneles solares nunca deben instalarse en un ángulo de inclinación de 0°, ya que esto fomentaría la acumulación de polvo, tierra y escombros que tendrán un efecto negativo en la producción de energía del panel. Asimismo, el ángulo de inclinación óptimo para que el panel reciba la cantidad máxima de irradiancia incidente es usualmente superior a 0°. Por lo general, es mejor establecer el ángulo de inclinación de todos los paneles solares de la instalación para que coincida con la latitud de la ubicación del proyecto con el fin de obtener una irradiancia óptima durante todo el año. Por ejemplo, una instalación a 20° norte (o sur) debe instalarse con un ángulo de inclinación de 20°.

Sin embargo, existen algunas desviaciones que podrían considerarse. Si la latitud de la ubicación del proyecto es inferior a 15°, entonces la recomendación de este manual es fijar el ángulo de inclinación en 15°. Esto se debe a que 15° es el ángulo de inclinación mínimo para promover el lavado por lluvia o agua de lavado, lo cual permite que el agua caiga hacia abajo en el panel para limpiar el polvo, la tierra y los escombros de la superficie del panel (*Solar World Technical Bulletin*, 2016). Asimismo, si el sistema de bombeo de energía solar no está diseñado para operar todos los meses del año, sino solo durante ciertos meses, entonces podría ser apropiado inclinar los paneles solares en un ángulo que maximice la irradiancia incidente que reciben los paneles solo durante esos meses.

El ángulo de inclinación se debe establecer durante el diseño de la instalación FV y la construcción de la instalación solar debe coincidir con el ángulo de inclinación diseñado.

4.2.2. Dirección cardinal de la instalación solar

Si el proyecto está en el hemisferio norte, los paneles deben mirar hacia el sur. Si el proyecto está en el hemisferio sur, los paneles deben mirar hacia el norte. En general, estas orientaciones basadas en la ubicación maximizarán la irradiancia incidente que reciben los paneles solares. Sin embargo, si el sistema de bombeo mediante energía solar no está diseñado para operar todos los meses del año, sino solo durante ciertos meses, entonces lo más apropiado sería colocar los paneles solares en una dirección ligeramente diferente para maximizar la irradiancia incidente que reciben los paneles solo durante esos meses. Asimismo, hay algunos diseños de instalaciones solares que utilizan instalaciones orientados al este y al oeste para maximizar la producción de energía solar a medida que el sol sale y se oculta. Esta es simplemente una configuración atípica opcional.

La dirección hacia donde se colocará la instalación se debe establecer durante el diseño de la instalación FV y la construcción de la instalación solar debe coincidir con la dirección diseñada.



Ángulo de inclinación de la instalación solar

*Un ángulo de inclinación óptimo permitirá que la máxima
cantidad de irradiancia incidental sea recibida por la
instalación solar.*



4.3. Requerimientos de cableado eléctrico

4.3.1. De paneles solares a la bomba

La corriente máxima permitida del tipo de material y tamaño del cable utilizado debe ser apropiada para la corriente que se transmite, incluido cualquier factor aplicado debido al cumplimiento requerido de los códigos eléctricos relevantes para la ubicación del proyecto (tales como IEC 60947-1, 62253 y 62548, así como los códigos NEC aplicables). El cableado debería incluir, entre otros, el cableado entre los paneles solares, el cableado de los paneles solares combinados al controlador de la bomba y el cableado al motor de la bomba. Por otro lado, si se utiliza fuentes de energía secundarias, todo el cableado desde estas fuentes de energía hasta el motor de la bomba debe tener una clasificación adecuada para la corriente que se transmite.

Todo el cable que se utilizará en el sistema y la ruta de cada tramo de cable deben identificarse durante el diseño. La construcción del sistema debe cumplir con el diseño de todo el cableado.

Asimismo, se recomienda que la caída de voltaje de CC (VD) debido a la longitud, el tipo de material y el tamaño del cable no supere el 5%. El cálculo de la caída de voltaje de CC en los cables es un paso importante en el diseño de las instalaciones solares. La caída de voltaje es la reducción del potencial eléctrico que ocurre cuando la electricidad viaja a través de materiales resistivos como cables. Para el cableado de CC, VD se calcula mediante la siguiente ecuación, donde L es la longitud del cable (en metros o pies) y R es la resistencia del cable (en Ω/km o Ω/kft):

$$VD = 2 \times L \times R \times \frac{I}{1000}$$

La resistencia está determinada por el material y el área de la sección transversal (CSA) del cable. La siguiente tabla muestra la resistencia de diferentes tamaños de cable recubierto de cobre.

Resistencia de cables de cobre a 75 °C (de NEMA)

TAMAÑO DEL CABLE	CSA		RESISTENCIA	
	Milésimas circulares	mm ²	Ω/KM	Ω/kft
18 AWG	1620	0.823	27.700	8.450
16 AWG	2580	1.31	17.300	5.290
14 AWG	4110	2.08	10.700	3.260
12 AWG	6530	3.31	6.730	2.050
10 AWG	10380	5.261	4.226	1.290
8 AWG	16510	3.867	2.653	0.809
6 AWG	26240	13.3	1.671	0.510
4 AWG	41740	21.15	1.053	0.321
2 AWG	66360	33.62	0.661	0.201

La resistencia también depende de la temperatura, por lo que los números de la tabla anterior deben modificarse para temperaturas distintas a 75 °C. Estas modificaciones se pueden realizar utilizando la siguiente ecuación, donde T_2 es la temperatura del conductor, R_2 es la resistencia en T_2 y R_1 es la resistencia a 75 °C.

$$R_2 = R_1 [1 + 0.00323 (T_2 - 75)]$$

Una vez que se conoce la caída de voltaje de CC, se puede usar para calcular el voltaje final y el vataje de la instalación solar. Para determinar el voltaje final, restar la caída de voltaje del V_{mpp} de la instalación (es decir, el voltaje al inicio del cable). Para el vataje final, multiplique el voltaje final por el I_{mpp} de la instalación solar.

4.3.2. Puesta a tierra (o conexión a tierra)

(referencia IEC 60347-7-712 y 62548)

Todo sistema de bombeo mediante energía solar debe estar conectado a tierra de manera adecuada. Por lo general, el fabricante de cada componente del sistema publica los requerimientos y recomendaciones para realizar una conexión a tierra adecuada. Estos incluyen, entre otros, las monturas y bastidores de los paneles solares, el motor de la bomba y la unidad de control, así como el inversor (si corresponde).

4.4. Identificar los componentes complementarios de la instalación solar

4.4.1. Interruptor de desconexión (o disyuntor)

Los interruptores de desconexión o disyuntores deben usarse de acuerdo con los códigos eléctricos relevantes de la ubicación del proyecto (tales como los códigos IEC o NEC). Asimismo, deben usarse de acuerdo con los requerimientos y recomendaciones de los fabricantes de paneles solares y motor. Todos los interruptores de desconexión utilizados deben tener una clasificación adecuada para la energía que deberán transmitir durante su uso. Por lo tanto, los interruptores de desconexión que transportan CC deben estar clasificados para CC y los interruptores de desconexión que transportan CA deben estar clasificados para CA. No utilizar el interruptor adecuado puede provocar un sobrecalentamiento y una falla del interruptor, así como también puede ocasionar un incendio.

Por otro lado, cada interruptor de desconexión debe tener una clasificación de amperaje máximo que exceda el amperaje que transmitirá, incluido cualquier factor aplicado debido al cumplimiento requerido de los códigos eléctricos relevantes según la ubicación del proyecto (tales como los códigos IEC o NEC). Cabe señalar que las unidades de control de algunos fabricantes de bombas también sirven como interruptor de desconexión.

4.4.2. Caja de conexiones

La caja de conexiones se utiliza para conectar varias cadenas de una instalación solar. Como se mencionó anteriormente, cada cadena consta de múltiples paneles solares conectados en serie y cada cadena se conecta en paralelo. Muchas bombas de energía solar solo requieren una sola cadena de paneles solares conectados en serie, lo cual significa que no se necesitará una caja de conexiones. Sin embargo, algunos motores de bombas que requieren un alto vataje para funcionar (por ejemplo, la mayoría de los sistemas que requieren un inversor) necesitarán múltiples cadenas de paneles solares combinados en paralelo. Por lo general, una caja de conexiones es necesaria si se van a combinar cuatro o más cadenas.

Las cajas de conexiones deben usarse de acuerdo con los códigos eléctricos relevantes de la ubicación del proyecto (tales como los códigos IEC o NEC). Asimismo, deben usarse según los requerimientos y recomendaciones de los fabricantes de paneles solares y motores. Todas las cajas de conexiones que se utilicen deben tener la clasificación adecuada para la forma de potencia y la cantidad de amperaje que transportarán.

4.5. Diseño de bastidores estructurales

(referencia IEC 60364-7-712 y 62548)



Foto cortesía de Water Mission.

Diseño de bastidores estructurales

La mayoría de los bastidores solares se construyen usando acero estructural (o aluminio u otro metal estructural) con una base de concreto de acero reforzado.



4.5.1. Diseño de bastidores estructurales

Los bastidores estructurales que soportan la instalación solar deben diseñarse de acuerdo con los códigos de construcción locales. Como mínimo, el bastidor debe estar diseñado para soportar el peso de la instalación solar y para soportar las cargas de viento, sismos y nieve usuales en la ubicación de la instalación solar. Asimismo, el ángulo de inclinación (ver **4.2.1. Ángulo de inclinación de la instalación solar**), la dirección cardinal de la instalación solar (ver **4.2.2. Dirección cardinal de la instalación solar**) y la altura deseada de la instalación con respecto al suelo se deben adaptar y anotar claramente en el diseño del bastidor estructural.

La mayoría de los bastidores solares se construyen con acero estructural (o aluminio u otro metal estructural) con una base de hormigón reforzado con acero. Por otro lado, es usual que se utilice acero estructural para el marco y soporte de los paneles solares. Si este es el caso, entonces no se debe permitir que el diseño final del marco de acero obstruya o cree una sombra sobre las células de los paneles solares. Esto afectará de manera negativa la producción de energía de la instalación de paneles solares.

4.5.2. Otras consideraciones del diseño de bastidores

Como se mencionó anteriormente, la altura del bastidor solar sobre el suelo debe identificarse como parte del diseño del bastidor solar. Los grandes campos de instalaciones solares que se construyen exclusivamente para la producción de energía suelen estar a menos de un metro del suelo (medido desde el borde más bajo de los paneles). Sin embargo, en entornos rurales de suministro de agua, es más común elevar los paneles 1.5 m o más (medido desde el borde más bajo). Hay varias diversas razones para elevar la altura del bastidor solar a 1.5 m o más. Un bastidor solar elevado evitará el crecimiento excesivo de vegetación en el suelo. A veces también podrá reducir la acumulación de polvo, tierra y escombros en los paneles solares. Puede disuadir a animales y niños (y quizás a adultos) de subirse a los paneles solares. Debe evitarse en todo momento aplicar presión, como caminar sobre la superficie de los paneles, ya que puede causar daños. Por último, la elevación también puede desalentar el robo de los paneles (se mencionan más medidas de prevención de robos en **4.5.3. Seguridad de los paneles solares.**)

Al igual que con cualquier estructura exterior, los

bastidores solares deben protegerse contra la corrosión y el desgaste y/o estar hechos de materiales resistentes a la corrosión. En el caso del acero estructural, todas las superficies de acero expuestas deben tratarse de manera adecuada para resistir la corrosión, ya sea mediante galvanización, pintura u otros tratamientos de superficie adecuados. No proteger de la corrosión y el desgaste todos los elementos estructurales afectará la integridad estructural del bastidor solar.

Asimismo, si se usa acero para enmarcar los paneles solares, y si ese acero no está protegido contra la corrosión, entonces la corrosión puede causar una obstrucción o proyectar una sombra sobre las células de los paneles solares. Esto no debe permitirse, ya que afectará negativamente a la producción de energía de la instalación solar.

4.5.3. Seguridad de los paneles solares

También se recomienda proporcionar medios para proteger los paneles solares contra robo o vandalismo. Como se indicó anteriormente, la altura del bastidor solar con respecto al suelo puede ser un impedimento. También se utiliza con frecuencia el acero estructural para construir un marco alrededor de los paneles solares con el fin de asegurarlos. Otro medio común de asegurar los paneles es con pernos de seguridad que no se pueden retirar sin herramientas especiales. Los pernos también pueden soldarse en el lugar o es posible protegerlos contra la manipulación soldando una pequeña pieza de acero sobre el perno para restringir el acceso. Por último, en algunos casos se puede utilizar un cerco perimétrico alrededor de toda la instalación solar como medida de seguridad y/o en combinación con otros métodos.

Por otro lado, también se suele considerar el uso de un pararrayos o supresor en las proximidades de un panel solar para protegerlo de posibles daños. Se recomienda comparar el costo de los posibles daños por rayos con el costo del equipo de protección contra rayos antes de proceder con la adquisición e instalación del equipo.

Si se desea, se deben identificar estas medidas de seguridad durante el diseño del bastidor de instalaciones solares.

4.6. Ubicación de la instalación solar

(referencia IEC 62253 – 6.2 Datos del cliente, e. descripción del proyecto)

La ubicación de la instalación solar debe elegirse considerando que los árboles, edificios y otras obstrucciones no produzcan sombra sobre los paneles solares. Como se mencionó en **4.1.3. Pérdidas de energía**, las sombras en la instalación solar ocasionarán que la salida de energía sea menor que la capacidad total.

Asimismo, se recomienda que la instalación se instale lo más cerca posible de la bomba y el motor. Realizar esta acción mantendrá la caída de voltaje al mínimo (ver **4.3.1. De paneles solares a la bomba**). Sin embargo, esta recomendación también debe equilibrarse con el requerimiento de evitar posibles sombras, así como cualquier otra preocupación de seguridad.

4.7. Mantenimiento de la instalación solar

El diseño de una instalación debe considerar y proporcionar los medios para los planes de mantenimiento necesarios con el fin de mantener la producción continua de energía. Los planes de mantenimiento de las instalaciones solares por lo general consisten en lavar regularmente los paneles para eliminar todo el polvo, la tierra y los escombros, inspeccionar rutinariamente todos los cables y conexiones de cables y volver a aplicar la pintura u otros materiales resistentes contra la corrosión al acero estructural del bastidor. Debe evitarse cualquier diseño de bastidor que dificulte demasiado dicho mantenimiento de rutina. Los bastidores solares que sean demasiado complicados para realizar el mantenimiento de forma rutinaria corren el riesgo de generar prácticas de mantenimiento no rutinarias o inexistentes.

Como se explica en **4.5.2. Otras consideraciones** del diseño de bastidores y **4.5.3. Seguridad de los paneles solares**, levantar los paneles 1.5 m o más puede disuadir a los animales y las personas de trepar a los paneles y también puede ayudar a protegerlos contra robos. Sin embargo, al considerar el diseño de la estructura, estos beneficios deben evaluarse junto con las consecuencias de colocar los paneles a una altura que haría que el mantenimiento sea muy engorroso. Es probable que se desanime a las personas de realizar el lavado de los paneles si se elevan a una altura de difícil acceso.

Como se mencionó anteriormente, una instalación solar con un ángulo de inclinación de mínimo 15° experimentará algo de lavado natural de los paneles durante un evento de lluvia. Sin embargo, a veces y en ciertos lugares, será necesario lavar la superficie de los paneles solares para asegurarse de que continúen produciendo la cantidad de energía deseada. **Ver 4.1.3. Pérdidas de energía para información** sobre los efectos de la pérdida de energía debido al polvo, la tierra y los escombros en los paneles solares. Por lo general, el lavado de los paneles solares se puede realizar con mucha agua y un dispositivo de limpieza suave. No se recomienda el uso de productos de limpieza ni de dispositivos de limpieza abrasivos. No se debe permitir ningún procedimiento de limpieza que pueda raspar, rayar o dañar los paneles solares de alguna otra manera. Asimismo, es recomendable limpiar los paneles solares por la mañana o al final del día, pero no durante las horas intermedias del día cuando la temperatura de los paneles solares estará al máximo. Realizar el lavado durante las horas intermedias del día puede provocar grietas. Sin embargo, en ningún momento durante el proceso de limpieza se debe aplicar presión a la superficie de los paneles como, por ejemplo, caminar sobre los paneles o usar un lavador a presión.

4.8. Verificación del diseño del sistema con respecto a la demanda diaria de agua del proyecto

(referencia IEC 62253 – 6.3 Características del sistema, 6.6 Verificación del diseño del sistema de bombeo FV con respecto al volumen de agua diario)

Antes de que el diseño de la instalación solar pueda considerarse completo, se debe comparar la producción de agua prevista con la demanda de agua diaria del proyecto. La energía que la instalación suministra al motor de la bomba permitirá que la bomba produzca una cierta cantidad de agua. IEC 62253 - 6.4 Verificación del diseño del sistema de bombeo FV con respecto al volumen de agua diario requiere que se evalúe el caudal volumétrico para un mínimo de cuatro conjuntos de datos diferentes de condiciones de energía solar para la ubicación del proyecto, específicamente 100%, 80%, 60% y 40% de las condiciones de potencia máxima.

En el caso de combinaciones de bomba y motor (o conjuntos de bombas FV) que pueden tomar una entrada de energía de CC, la cantidad de agua producida puede calcularse mediante la curva de la bomba proporcionada por el fabricante (para ver un ejemplo, consulte la Figura 4.8.a a continuación). La potencia que requiere el motor de la bomba se obtiene al localizar el punto en la curva de la bomba donde el caudal deseado se encuentra con el CDT calculado y luego al leer la potencia requerida en este punto. Si se trabaja al revés, se puede calcular un caudal para la energía que suministra la instalación en cada hora del día. Para hacer esto, se asume que la CDT permanecerá aproximadamente constante o se puede recalcular la CDT en cada caudal para mayor precisión (o para confirmar el supuesto).

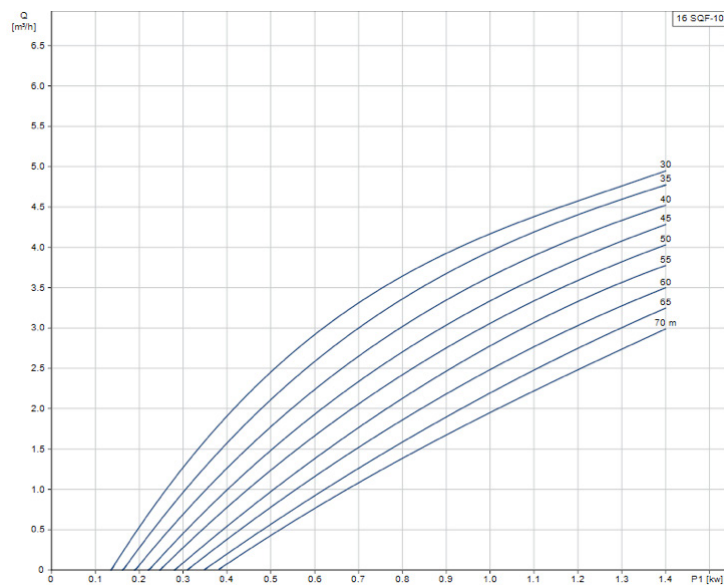



Figura 4.8.a. Curva de rendimiento de la bomba solar para Grundfos 16 SQF-10



Revisión del diseño del sistema para la demanda de agua diaria del proyecto

Antes de considerar que el diseño de la instalación solar está completo, la producción de agua prevista debe compararse con la demanda de agua diaria del proyecto. La energía suministrada por la instalación hacia el motor de la bomba permitirá que la bomba produzca una cierta cantidad de agua.



Sin embargo, en un diseño que utiliza una bomba e inversor alimentados por CA, por lo general no es verdad que la CDT se mantenga aproximadamente constante. Esto se debe a que la fluctuación horaria de la energía para este tipo de sistemas es mucho mayor. En su lugar, podemos usar las leyes de afinidad, las cuales son aplicables a las bombas centrífugas estándar, para calcular cómo funcionará la bomba con la cantidad diferente de energía que suministra la instalación solar. Las leyes de afinidad se expresan de la siguiente manera:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$$

(*P* = Potencia; *N* = Velocidad; *Q* = Flujo; *H* = Carga)

En las bombas sumergibles, los cambios de velocidad se logran por lo general mediante un variador de frecuencia. La mayoría de los inversores que se utilizan en aplicaciones de bombeo suministran energía al motor de la bomba mediante un variador de frecuencia. Dado que la frecuencia (Hz) se puede intercambiar con la velocidad, la frecuencia se puede usar en lugar de la velocidad en las leyes de afinidad que se muestran arriba. Por lo tanto, estas leyes se pueden usar para calcular cómo se traduce la cantidad de energía suministrada por hora en rendimiento de la bomba. Esto se muestra como múltiples curvas de rendimiento de la bomba (para ver un ejemplo, consulte la Figura 4.8.b a continuación).

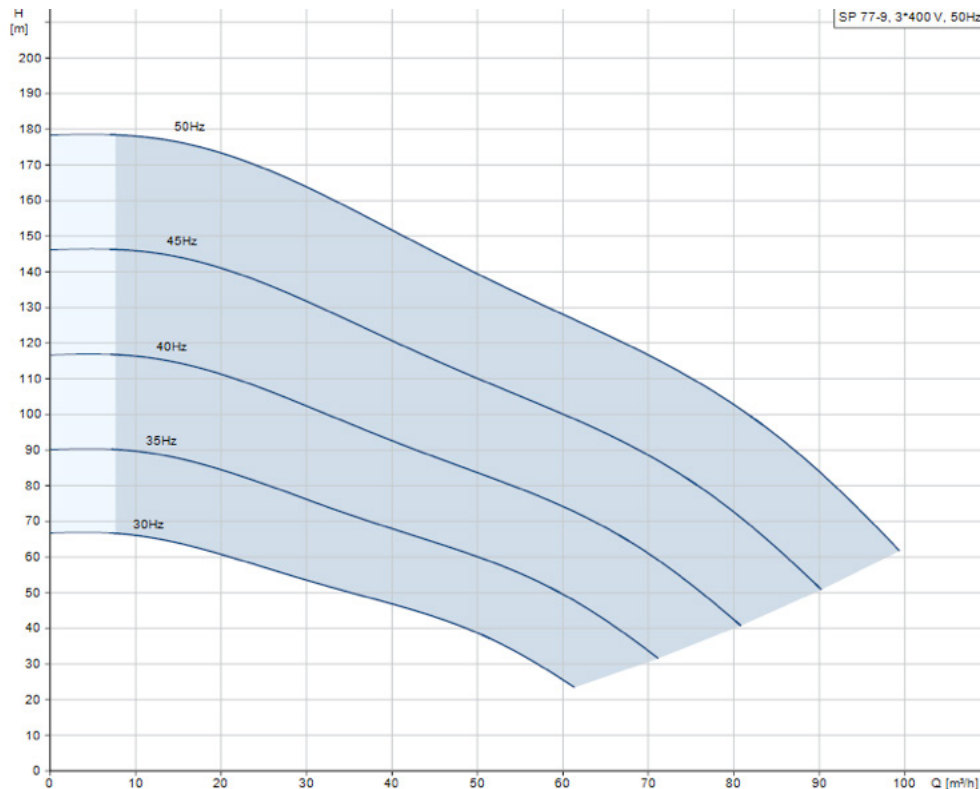


Figura 4.8.b Curva de rendimiento de la bomba para Grundfos SP 77-9 a frecuencias diferentes

Estas curvas de rendimiento se pueden usar luego para mostrar cuál será el rendimiento de la bomba con un variador de frecuencia (flujo y CDT) en el sistema que se está diseñando. Este proceso se detalla en un ejemplo de diseño que se muestra después de esta sección (y en el Anexo g). La cantidad total aproximada de agua que se producirá diariamente, obtenida de la suma de la cantidad aproximada producida cada hora, se compara con la demanda diaria de agua del proyecto (ver **2.2. Demanda diaria de agua del proyecto**). Si el total es significativamente mayor o menor que la demanda diaria de agua del proyecto, entonces se debe rediseñar la instalación. IEC 62253 establece que el total suministrado debe estar dentro de una tolerancia de -5% a +20% de la demanda diaria de agua del proyecto. Si el total suministrado está fuera de esta tolerancia, entonces es necesario un rediseño ya sea con un panel solar de diferente tamaño, un número diferente de paneles o una configuración de instalación diferente. Si el total suministrado está dentro de la tolerancia, se podría confiar más en el diseño analizando las mismas opciones de rediseño.

Sin embargo, bajo ciertas condiciones del proyecto, es posible que no se pueda lograr la tolerancia de -5% a +20%. Esto podría deberse a muchas causas posibles, tales como una cantidad restringida de área para la instalación solar, la inaccesibilidad de un tamaño o cantidad óptimos de paneles solares, o la inaccesibilidad de la bomba y motor de un tamaño óptimo. En este caso, se debe llegar a un acuerdo entre el propietario y el diseñador del sistema de agua para modificar la demanda diaria del proyecto de agua de modo que coincida con la cantidad de agua que el sistema más óptimo podrá producir. No hacerlo ocasionará la instalación de un sistema de agua mediante energía solar que nunca podrá satisfacer las demandas esperadas de los usuarios.



Foto cortesía de UNICEF

Ejemplo: Diseño del sistema FV para una bomba solar

(referencia IEC 62253 – 6.3 Características del sistema, 6.6 Verificación del diseño del sistema de bombeo FV con respecto al volumen de agua diario)

En un ejemplo anterior, determinamos que la demanda diaria de agua del proyecto para una comunidad en la zona rural de Kenia era de 13,120 litros al día. En otro ejemplo, seleccionamos una bomba que podría suministrar un caudal deseado de alrededor de 2 m³/h a una CDT de 60 metros (se seleccionó una Grundfos 11 SQF-2). Después de consultar las curvas de bomba para esta bomba, se determinó que el motor de la bomba requerirá aproximadamente 550 W de potencia para lograr el rendimiento deseado. En una revisión adicional de las especificaciones del fabricante, se notó que el motor tiene un rango de voltaje de entrada de 30 a 300 VCC y un consumo máximo de corriente de 8.4 A.

Paso 1: Determinar la temperatura ambiente y las condiciones de irradiancia solar para el sitio del proyecto (ver la Sección 2.5.2.).

Como se mencionó en 2.5.3. **Datos mensuales de temperatura** e irradiancia, la temperatura ambiente y la irradiancia solar fluctúan a lo largo del año. Con el fin de garantizar que el sistema de agua cubra la demanda de agua durante todos los meses del año, el sistema FV se diseñará utilizando los datos del mes con los valores de irradiancia más bajos. Después de observar los datos disponibles en línea de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), vemos que durante el mes de irradiancia más baja, la ubicación del proyecto tiene una temperatura ambiente promedio durante el día de 20.9 °C y un perfil de irradiancia diario como se muestra a continuación:

HORA	IRRADIANCIA (W/m ²)
8	327
9	430
10	503
11	551
12	565
13	551
14	503
15	430
16	327

Paso 2: Calcular el rendimiento estimado del panel para la ubicación del proyecto.

Los paneles solares con la mayor disponibilidad para el proyecto tienen el siguiente rendimiento en condiciones de prueba estándares (STC):

- Punto de máxima potencia (P_{max}): 290 W
- Voltaje del punto de máxima potencia (V_{mpp}): 31.9 V
- Corriente del punto de máxima potencia (I_{mpp}): 9.2 A
- Voltaje de circuito abierto (V_{oc}): 39.6 V
- Corriente de cortocircuito (I_{sc}): 9.75 A
- Coeficiente de temperatura ($TC V_{oc}$): -0.29%/C
- Temperatura normal de funcionamiento de la célula (NOCT): 46°C

El cálculo del rendimiento estimado del panel para la ubicación del proyecto se realiza mediante las ecuaciones en **4.1.1.1. Cálculo del rendimiento estimado** de un panel según la ubicación del proyecto de cada hora del día. A continuación, mostraremos los cálculos detallados para las condiciones de irradiancia a las 12 en punto

Paso 2a: Calcular la temperatura de la célula.

$$\text{Temp. de célula (°C)} = \text{Temp. ambiente (°C)} + (\text{NOCT} - 20^\circ\text{C}) \times \frac{\text{Irradiancia } \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)}{800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$39.3^\circ\text{C} = 20.9^\circ\text{C} + (46^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \times \frac{565 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

Paso 2b: Calcular el voltaje de circuito abierto a la temperatura de la célula.

$$V_{oc} = \text{STC } V_{oc} + (\text{Temp. de célula} - 25^\circ\text{C}) \times \text{STC } V_{oc} \times TC V_{oc}$$

$$38.0 \text{ V} = 39.6 \text{ V} + (39.3^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) \times 39.6 \text{ V} \times -0.29\%/C$$

Paso 2c: Calcular la corriente de cortocircuito a la irradiancia incidente determinada.

$$I_{sc} = \text{STC } I_{sc} \times \frac{\text{Irradiancia } \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)}{1,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \quad 5.51 \text{ A} = 9.75 \text{ A} \times \frac{565 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{1,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

Paso 2d: Calcular la corriente del punto de máxima potencia a la irradiancia determinada.

$$I_{mpp} = \text{STC } I_{mpp} \times \frac{\text{Irradiancia } \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)}{1,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \quad 5.2 \text{ A} = 9.2 \text{ A} \times \frac{565 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{1,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

Paso 2e: Calcular la salida del panel solar bajo las condiciones determinadas.

$$P_{\max} (W) = V_{oc} \times I_{sc} \times \frac{STC I_{mpp} \times STC V_{mpp}}{STC I_{sc} \times STC V_{oc}}$$

$$159.2 \text{ W} = 38.0 \text{ V} \times 5.51 \text{ A} \times \frac{9.2 \text{ A} \times 31.9 \text{ V}}{9.75 \text{ A} \times 39.6 \text{ V}}$$

Paso 2f: Calcular el voltaje en el punto de máxima potencia del panel.

$$V_{mpp} = \frac{P_{\max}}{I_{mpp}} \quad 30.6 \text{ V} = \frac{159.2 \text{ W}}{5.2 \text{ A}}$$

Siguiendo los mismos pasos, se pueden calcular las condiciones para cada hora del día. Los resultados de dichos cálculos se presentan en la siguiente tabla:

HORA	IRRADIANCIA (W/m ²)	TEMPERATURA DE LA CÉLULA (°C)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	I _{MPP} (A)	P _{MAX} (W)	V _{MPP} (V)
8	327	31.5	38.9	3.19	3.0	94.3	31.4
9	430	34.9	38.5	4.19	4.0	122.6	30.7
10	503	37.2	38.2	4.90	4.6	142.3	30.9
11	551	38.8	38.0	5.37	5.1	155.1	30.4
12	565	39.3	38.0	5.51	5.2	159.2	30.6
13	551	38.8	38.0	5.37	5.1	155.1	30.4
14	503	37.2	38.2	4.90	4.6	142.3	30.9
15	430	34.9	38.5	4.19	4.0	122.6	30.7
16	327	31.5	38.9	3.19	3.0	94.3	31.4

Paso 3: Diseñar la configuración de la instalación solar.

Ahora que sabemos la potencia de salida en un solo panel solar considerado para la ubicación de este proyecto, podemos realizar una estimación preliminar de la cantidad de paneles solares necesarios para la instalación. Como se indicó en un ejemplo anterior, uno de los objetivos del diseño es producir agua durante las siete horas centrales del día como mínimo (esto se verificará al final del ejemplo). Por lo tanto, podemos dividir la cantidad de energía requerida (550W) por la cantidad más baja de energía por panel durante las siete horas centrales del día (122.6W). Hacer esto de manera aproximada nos indica que la instalación deberá constar de alrededor de cuatro paneles ($550 \text{ W} \div 122.6 \text{ W} \approx 4$).

Como se mencionó en **4.1.2 Configuración de una instalación solar**, el cableado de los paneles solares en serie aumentará el voltaje y el cableado en paralelo aumentará la corriente. Asimismo, los paneles suelen estar cableados en serie para lograr el voltaje máximo con el menor número de paneles solares. Por lo tanto, el siguiente paso sería verificar la salida de potencia de la instalación durante cada hora de irradiación con cuatro paneles conectados en serie (usando las ecuaciones dadas en **4.1.2. Configuración de una instalación solar**). Como se hizo anteriormente, mostraremos los cálculos detallados para las condiciones de irradiación a las 12 en punto.

$$V_{oc} \text{ de la instalación} = V_{oc} \text{ por panel} \times \text{número de paneles en serie}$$

$$152 \text{ V} = 38.0 \text{ V} \times 4$$

$$V_{mpp} \text{ de la instalación} = V_{mpp} \text{ por panel} \times \text{número de paneles en serie}$$

$$122 \text{ V} = 30.6 \text{ V} \times 4$$

$$I_{mpp} \text{ de la instalación} = I_{mpp} \text{ por panel} \times \text{número de cadenas paralelas}$$

$$5.2 \text{ A} = 5.2 \text{ A} \times 1$$

$$P_{max} (W) \text{ de la instalación} = I_{mpp} \text{ de la instalación} \times V_{mpp} \text{ de la instalación}$$

$$634 \text{ W} = 5.2 \text{ A} \times 122 \text{ V}$$

Paso 4: Reducir la potencia de salida de la instalación.

Esta salida de potencia calculada a partir de la instalación debe reducirse para tener en cuenta las pérdidas de potencia (como se describe en 4.1.3. **Pérdidas de energía**). Usaremos un factor de reducción de 0.90 según lo recomendado para un sistema sin inversor.

$$P_{reducido} (W) \text{ de la instalación} = P_{max} (W) \text{ de la instalación} \times \text{factor de reducción}$$

$$571 \text{ W} = 634 \text{ W} \times 0.90$$

Se pueden calcular las condiciones para cada hora del día utilizando las mismas ecuaciones. Los resultados de dichos cálculos se presentan en la siguiente tabla:

HORA	V _{OC} DE LA INSTALACIÓN (V)	V _{MPP} DE LA INSTALACIÓN (V)	I _{MPP} DE LA INSTALACIÓN (A)	P _{MAX} DE LA INSTALACIÓN (W)	P _{REDUCIDO} DE LA INSTALACIÓN (W)
8	156	126	3.0	378	340
9	154	123	4.0	492	443
10	153	124	4.6	570	513
11	152	122	5.1	622	560
12	152	122	5.2	634	571
13	152	122	5.1	622	560
14	153	124	4.6	570	513
15	154	123	4.0	492	443
16	156	126	3.0	378	340

Paso 5: Verificar que el voltaje y el amperaje de la instalación satisfacen las especificaciones del motor de la bomba.

El voltaje y el amperaje suministrados se deben comparar con las especificaciones del motor de la bomba. Como se indicó anteriormente, el motor de la bomba tiene un rango de voltaje de entrada de 30 a 300 VCC y un consumo máximo de corriente de 8.4 A. Como se puede ver en la tabla anterior, el Voc de la instalación es mayor que 30 pero menor que 300 V. Además, dado que los paneles solares se conectarán en serie, la corriente de la instalación será equivalente a la corriente de un solo panel, la cual es menor que el consumo máximo de corriente de la bomba.

Paso 6: Confirmar que la instalación diseñada permite que la bomba suministre la demanda de agua diaria del proyecto.

La verificación final del diseño es para ver si la energía que suministra la instalación al motor de la bomba permitirá que la bomba pueda abastecer la demanda de agua diaria del proyecto de 13,120 litros al día. Esto se puede estimar mediante la curva de la bomba que proporciona el fabricante. Como se muestra en **3.2.2.2. Selección de una bomba** utilizando las curvas de rendimiento de la bomba solar, la potencia que requiere el motor de la bomba se obtiene al localizar el punto de la curva de la bomba donde el caudal deseado se encuentra con la línea CDT y luego leer la potencia requerida en este punto. Si se trabaja al revés, se puede aproximar un caudal para la energía que suministra la instalación en cada hora del día. (Para ello, se asume que la CDT permanecerá aproximadamente constante o que la CDT se puede recalcular en cada caudal para obtener una mayor precisión). Al usar las curvas de la bomba para Grundfos 11 SQF-2, se observan las siguientes condiciones:

HORA	PREDUCIDO DE LA INSTALACIÓN (W)	CAUDAL APROXIMADO A CDT DE 60M (m ³ /H)	PRODUCCIÓN DE AGUA POR HORA (L)
8	340	1.2	1,200
9	443	1.5	1,500
10	513	1.8	1,800
11	560	2.0	2,000
12	571	2.1	2,100
13	560	2.0	2,000
14	513	1.8	1,800
15	443	1.5	1,500
16	340	1.2	1,200
PRODUCCIÓN TOTAL DE AGUA DIARIA (L):			15,100

Así, un aproximado del total de agua diaria producida es de 15,100 litros al día. Si este número fue significativamente mayor o menor que la demanda diaria de agua del proyecto (13,120 litros al día), entonces se debe rediseñar la instalación. IEC 62253 establece que el total suministrado debe estar dentro de una tolerancia de -5% a +20% de la demanda diaria de agua del proyecto. Nuestra producción diaria total aproximada de agua (15,000 litros) es un 15% mayor que la demanda de agua diaria del proyecto (13,120 litros), por lo que nuestro diseño cumple con el requisito. Si el total suministrado estuviera fuera de esta tolerancia, entonces es necesario rediseñarlo con un panel solar de diferente tamaño, un número diferente de paneles o una configuración de instalación diferente.

Ejemplo: Diseño de sistema FV para una bomba de CA con inversor

(referencia IEC 62253 – 6.3 Características del sistema, 6.6 Verificación del diseño del sistema de bombeo FV con respecto al volumen de agua diario)

Este ejemplo usa una ubicación similar, con las mismas condiciones de temperatura e irradiancia, así como la misma selección de panel solar del ejemplo anterior. Esto mostrará la diferencia en el diseño de un sistema con una bomba y un inversor alimentados por CA, en comparación con una combinación de bomba y motor que puedan recibir alimentación de CC.

Se ha completado una prueba de rendimiento en un pozo en una gran comunidad en la zona rural de Kenia. Los resultados de la prueba muestran que el rendimiento máximo del pozo es de 39 m³/h con un nivel de agua dinámico de 94.5 metros por debajo del suelo. La comunidad desea acceder al 90% del rendimiento máximo para producir un volumen diario de agua de 295,000 litros al día desde el pozo. Utilizando un flujo de diseño de 35 m³/h (90% del rendimiento de 39 m³/h), se realizaron cálculos hidráulicos para obtener que la CDT del sistema de agua planificado será de 102.2 metros. Después de ver que todas las combinaciones de bomba y motor disponibles (o conjuntos de bombas FV) que pueden tomar la entrada de energía de CC no podían funcionar a la capacidad deseada, se consideró utilizar una bomba de CA con un inversor. Se seleccionó una bomba y un motor de CA que pueden funcionar a un punto de trabajo de 34.9 m³/h y 102.1 metros de carga a una potencia de motor requerida de 14.3 kW. El motor es un motor trifásico nominal de 50 Hz, 380 V. La documentación del fabricante de la bomba y el motor sugiere que se utilice un inversor de 18.5 kW que cumpla con los requisitos de potencia del motor (50 Hz, 380 V nominal). El inversor tiene un rango de voltaje de entrada de 400 a 800 VCC y una salida de corriente máxima de 38.0 A, así como también está equipado con un variador de frecuencia. Se comprobará la idoneidad del inversor durante el diseño.

Usando los mismos paneles solares de 290 W que en el ejemplo anterior, el desempeño de un panel individual durante las horas de luz solar en la ubicación del proyecto es el siguiente (para detalles de cálculo, ver el ejemplo anterior):

HORA	IRRADIANCIA (W/m ²)	TEMPERATURA DE LA CÉLULA (°C)	V _{oc} (V)	I _{sc} (A)	I _{MPP} (A)	P _{MAX} (W)	V _{MPP} (V)
8	327	31.5	38.9	3.19	3.0	94.3	31.4
9	430	34.9	38.5	4.19	4.0	122.6	30.7
10	503	37.2	38.2	4.90	4.6	142.3	30.9
11	551	38.8	38.0	5.37	5.1	155.1	30.4
12	565	39.3	38.0	5.51	5.2	159.2	30.6
13	551	38.8	38.0	5.37	5.1	155.1	30.4
14	503	37.2	38.2	4.90	4.6	142.3	30.9
15	430	34.9	38.5	4.19	4.0	122.6	30.7
16	327	31.5	38.9	3.19	3.0	94.3	31.4

Paso 1: Diseñar la configuración de la instalación solar.

Cuando sea evidente que se utilizarán varias cadenas de paneles solares, se deben tener en cuenta los parámetros de voltaje y corriente del motor o inversor. Para el inversor considerado, los paneles solares

deberán combinarse de tal manera que el voltaje sea mayor a 400 V y menor a 800 V con una corriente no mayor a 38.0 A. Usando estos parámetros, podemos ver que la instalación tendrá entre 11 ($400 \text{ V} \div 38.0 \text{ V} = 11$) y 21 ($800 \text{ V} \div 38.0 \text{ V} = 21$) paneles solares en serie y siete ($38.0 \text{ A} \div 5.51 \text{ A} = 7$) o menos cadenas. Un diseño minucioso verificará diferentes combinaciones para lograr la fuente de alimentación requerida utilizando el menor número de paneles solares. El resto de este ejemplo utilizará siete cadenas de 18 paneles solares para un total de 126 paneles.

Paso 2: Verificar la potencia de salida de la instalación.

Se debe verificar la salida de la instalación durante cada hora de irradiancia (utilizando las ecuaciones dadas en **4.1.2. Configuración de una instalación solar**). A continuación, mostramos los cálculos detallados para las condiciones de irradiancia a las 12 en punto.

$$V_{oc} \text{ de la instalación} = V_{oc} \text{ por panel} \times \text{número de paneles en serie}$$

$$684.0 \text{ V} = 38.0 \text{ V} \times 18$$

$$V_{mpp} \text{ de la instalación} = V_{mpp} \text{ por panel} \times \text{número de paneles en serie}$$

$$550.8 \text{ V} = 30.6 \text{ V} \times 18$$

$$I_{mpp} \text{ de la instalación} = I_{mpp} \text{ por panel} \times \text{número de cadenas paralelas}$$

$$36.4 \text{ A} = 5.2 \text{ A} \times 7$$

$$P_{max} (W) \text{ de la instalación} = I_{mpp} \text{ de la instalación} \times V_{mpp} \text{ de la instalación}$$

$$20.0 \text{ kW} = 36.4 \text{ A} \times 550.8 \text{ V}$$

Paso 3: Reducir la potencia de salida de la instalación.

Esta salida de potencia calculada a partir de la instalación debe reducirse para tener en cuenta las pérdidas de potencia (como se describe en **4.1.3. Pérdidas de energía**). Usaremos un factor de reducción de 0.85 según lo recomendado para un sistema con un inversor.

$$P_{reducido} (W) \text{ de la instalación} = P_{max} (W) \text{ de la instalación} \times \text{factor de reducción}$$

$$17.0 \text{ kW} = 20.0 \text{ kW} \times 0.85$$

Se pueden calcular las condiciones para cada hora del día utilizando las mismas ecuaciones. Los resultados de dichos cálculos se presentan en la siguiente tabla:

HORA	V_{oc} DE LA INSTALACIÓN (V)	V_{mpp} DE LA INSTALACIÓN (V)	I_{mpp} DE LA INSTALACIÓN (A)	P_{max} DE LA INSTALACIÓN (kW)	$P_{reducido}$ DE LA INSTALACIÓN (kW)
8	700.2	565.2	21.0	11.9	10.1
9	693.0	552.6	28.0	15.5	13.2
10	687.6	556.2	32.2	17.9	15.2
11	684.0	547.2	35.7	19.5	16.6
12	684.0	550.8	36.4	20.0	17.0
13	684.0	547.2	35.7	19.5	16.6
14	687.6	556.2	32.2	17.9	15.2
15	693.0	552.6	28.0	15.5	13.2
16	700.2	565.2	21.0	11.9	10.1

Paso 4: Verificar que el voltaje y el amperaje de la instalación pueden satisfacer al inversor.

Antes de estimar la cantidad de agua que se producirá en estas condiciones de energía, la tabla anterior se puede utilizar para verificar la idoneidad del inversor que sugiere la documentación del fabricante. El inversor sugerido es un inversor de 18.5 kW, 50 Hz con un rango de voltaje de entrada de 400 a 800 VCC y una salida de corriente máxima de 38.0 A. Los resultados del cálculo en la tabla anterior cumplen con las condiciones de voltaje y corriente del inversor y la potencia que se transportará está lo suficientemente cerca de la clasificación de la potencia nominal del inversor.

Paso 5: Confirmar que la instalación diseñada permite que la bomba suministre la demanda de agua diaria del proyecto.

Mediante el uso de las leyes de afinidad y las curvas de rendimiento de la bomba (ver 4.8. Verificación del diseño del sistema con respecto a la demanda diaria de agua del proyecto), ahora podemos calcular una cantidad prevista de agua producida cada hora. El primer paso es calcular la frecuencia utilizando la relación de la ley de afinidad entre potencia y velocidad. Tenga en cuenta que, como se indica en la sección 4.8, la frecuencia se puede utilizar indistintamente con la velocidad. Aquí se muestra el cálculo de las condiciones a las 8 en punto.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$
$$N_2 = \left(\frac{10.1kW}{14.3kW}\right)^{1/3} \times 50Hz = 44.5Hz$$

Sin embargo, como se indicó anteriormente, el motor de la bomba y el inversor son de 50 Hz. Por lo tanto, la frecuencia nunca superará los 50 Hz. La frecuencia calculada para cada uno se presenta en la siguiente tabla:

HORA	PRODUCIDO DE LA INSTALACIÓN (kW)	FRECUENCIA (Hz)
8	10.1	44.5
9	13.2	48.7
10	15.2	50
11	16.6	50
12	17.0	50
13	16.6	50
14	15.2	50
15	13.2	48.7
16	10.1	44.5

A continuación, se determinan las curvas de desempeño para cada frecuencia calculada. Esto se lleva a cabo calculando varios puntos a lo largo de la curva de desempeño mediante el uso de las leyes de afinidad. Si tomamos cada frecuencia calculada y las relaciones de la ley de afinidad entre el flujo y la velocidad, así como entre la carga y la velocidad, se pueden determinar los puntos a lo largo de la curva de desempeño de la bomba correspondiente a cada frecuencia calculada. A continuación, se muestran los cálculos para un solo punto a lo largo de la curva de desempeño que corresponde a una frecuencia de 44.5 Hz.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$Q_2 = \frac{44.5\text{Hz}}{50\text{Hz}} \times 3.2 \text{ m}^3/\text{hr} = 2.8 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$$

$$H_2 = \left(\frac{44.5\text{Hz}}{50\text{Hz}}\right)^2 \times 195.1\text{m} = 154.5\text{m}$$

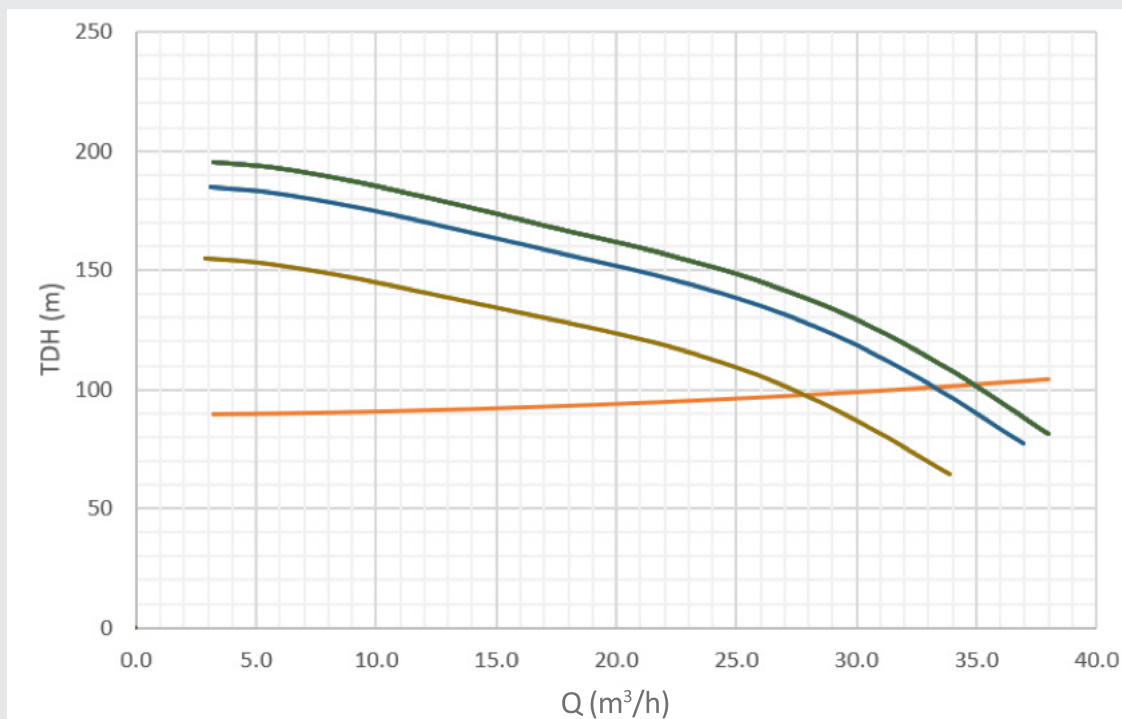
(P = Potencia; N = Velocidad; Q = Flujo; H = Altura)

Será necesario calcular varios puntos a lo largo de la curva de desempeño para cada frecuencia. A continuación, se muestran los resultados del cálculo para diez puntos a lo largo de la curva. Una cantidad mayor o menor de puntos corresponderán a una mayor o menor precisión, respectivamente, en los resultados finales. En la siguiente tabla, hemos calculado diez puntos en la curva de desempeño correspondientes a 44.5 Hz, e iniciando con diez puntos a lo largo de la curva de desempeño de máxima potencia o 50 Hz.

Puntos en la curva de desempeño para 50 Hz		Puntos en la curva de desempeño para 44.5 Hz	
Q_1 (m ³ /h)	H_1 (m)	Q_2 (m ³ /h)	H_2 (m)
3.2	195.1	2.8	154.5
6	192.4	5.3	152.4
10	185.0	8.9	146.5
18	166.2	16.0	131.6
22	156.7	19.6	124.1
26	145.1	23.1	114.9
30	129.3	26.7	102.4
34	107.7	30.3	85.3
34.9	102.1	31.1	80.9
38	81.5	33.8	64.6

Estos mismos cálculos también deberán realizarse para la curva de desempeño de 48.7 Hz.

Es importante reconocer que los puntos (Q_2 , H_2) en la tabla anterior representan puntos a lo largo de una curva de desempeño para la bomba y no hay puntos a lo largo de la curva del sistema para el sistema de agua propuesto. En el siguiente gráfico, las curvas verde y azul son las curvas de desempeño de la bomba a 50 Hz, 48.7 Hz y 44.5 Hz.



La curva naranja en el gráfico representa la curva del sistema para el sistema de agua propuesto. La curva del sistema se determina calculando la CDT de múltiples valores de flujo (como se indicó anteriormente, esta guía de diseño no presenta los métodos de cálculo de CDT, ya que los métodos de cálculo de CDT para un sistema de bombeo mediante energía solar no presentan diferencias con respecto a los métodos usados en cualquier otro sistema de bombeo mecanizado).

Las intersecciones de la curva del sistema y cada curva de desempeño representan el caudal del sistema a la frecuencia correspondiente para cada hora del día. El valor de flujo en cada intersección se puede observar de manera gráfica y se calcula mediante el siguiente método. La siguiente tabla muestra los valores de caudal y carga a lo largo de la curva de desempeño de 44.5 Hz y la CDT del sistema de agua propuesto para cada caudal.

Q_2 (m³/hr)	H_2 (m)	CDT (m)
2.8	154.5	89.6
5.3	152.4	89.9
8.9	146.5	90.5
16.0	131.6	92.5
19.6	124.1	93.8
23.1	114.9	95.4
26.7	102.4	97.2
30.3	85.3	99.2
31.1	80.9	100.1
33.8	64.6	101.4

Se puede observar en el gráfico anterior que la curva del sistema se cruza con la curva de desempeño de 44.5 Hz entre 25 m³/h y 30 m³/h. Asimismo, la tabla anterior muestra que la CDT para 26.7 m³/h está por debajo de la carga de la curva de desempeño, pero la CDT para 30.3 m³/h está por encima de la carga de la curva de desempeño. Mediante el uso de un método de interpolación, podemos usar estos caudales y los valores correspondientes de CDT y de carga de la curva de desempeño para calcular el caudal donde la CDT correspondiente del sistema de agua propuesto y la carga de la curva de desempeño sean iguales.

$$\frac{(30.3 - 26.7)}{[(99.2 - 85.3) - (97.2 - 102.4)]} = \frac{(Q_{\text{en la intersección}} - 26.7)}{[0 - (97.2 - 102.4)]}$$

$$Q_{\text{intersección}} = 27.7 \text{ m}^3/\text{h}$$

Se debe tener en cuenta que este caudal se puede verificar al calcular la CDT del sistema de agua propuesto para este caudal y al verificar la carga en la curva de desempeño de la bomba para ver que los

HORA	PREDUCIDO DE LA INSTALACIÓN (kW)	FRECUENCIA (Hz)	FLUJO (m³/h)	PRODUCCIÓN DE AGUA POR HORA (L)
8	10.1	44.5	27.7	27,700
9	13.2	48.7	33.2	33,200
10	15.2	50	34.9	34,900
11	16.6	50	34.9	34,900
12	17.0	50	34.9	34,900
13	16.6	50	34.9	34,900
14	15.2	50	34.9	34,900
15	13.2	48.7	33.2	33,200
16	10.1	44.5	27.7	27,700
PRODUCCIÓN TOTAL DE AGUA DIARIA (L):				296,300

dos valores sean iguales. El agua diaria total aproximada producida (296,300 litros) es menor a 1% más que la demanda diaria de agua del proyecto (295,000 litros), por lo que nuestro diseño cumple con el requisito de IEC 62253 de estar dentro de una tolerancia de -5% a + 20% de la demanda diaria de agua del proyecto.

5. Almacenamiento de agua

5.1. Consideraciones del almacenamiento de agua

La mayoría de los sistemas de suministro de agua rurales, incluidos los sistemas mediante energía solar, utilizan un tanque de almacenamiento de agua para equilibrar la producción diaria de agua del sistema con la demanda diaria de agua de los usuarios. Por esta razón, se recomienda usar un tanque de almacenamiento de agua.

5.2. Volumen del tanque de almacenamiento de agua

(referencia IEC 62253 – 6.2 Datos del cliente, e. descripción del proyecto)

Es una práctica común almacenar el agua en un tanque antes de distribuirla a los consumidores. Independientemente del diseño de distribución de agua después del tanque de almacenamiento (un proceso de diseño que no se analiza como



Almacenamiento de agua

La mayoría de los sistemas rurales de suministro de agua, incluyendo sistemas mediante energía solar, utilizan un tanque de almacenamiento de agua para equilibrar la producción de agua diaria del sistema con la demanda de agua diaria de los usuarios.



parte de esta guía), el tamaño del almacenamiento de agua por lo general se basa en el volumen y el patrón de demanda diaria del sistema de agua. En el caso de los sistemas que funcionan con energía solar, también se debe considerar la variación en el agua producida a lo largo del día, ya que la producción de agua estará restringida a las horas de luz solar y puede verse limitada por un clima nublado. Por lo tanto, los tanques de almacenamiento de agua se pueden usar para suministrar agua durante las horas sin bombeo o en los días en que el clima puede afectar la producción de agua segura.

Aunque esta guía no especifica un método en particular para determinar el tamaño de un tanque de almacenamiento de agua, la elección final debe hacerse comparando el patrón de demanda de agua diaria con la producción de agua diaria del sistema. La recomendación mínima de esta guía es que el tanque de almacenamiento tenga un tamaño tal que las fluctuaciones diarias (y mensuales) del agua producidas por el sistema de suministro mediante energía solar no interrumpan el agua suministrada a los usuarios. Sin embargo, también se recomienda evitar el almacenamiento excesivo de agua. Los costos de capital que se asocian con la construcción e instalación de almacenamiento de agua suelen ser altos. Por lo tanto, incluir un gran volumen de almacenamiento que no es necesario en un proyecto dará lugar a costos significativos que serán injustificados e innecesarios. Asimismo, se debe evitar el almacenamiento excesivo de agua, ya que el almacenamiento prolongado del agua por lo general conduce al deterioro de la calidad de agua.

Otras consideraciones adicionales para determinar el tamaño de un tanque de almacenamiento de agua son las siguientes:

Almacenamiento de emergencia: Las interrupciones del suministro pueden ocurrir por múltiples razones, incluyendo la contaminación de una fuente, el mantenimiento del sistema de agua y eventos climáticos extremos. Cuando ocurren estas interrupciones en el servicio, las comunidades dependen del almacenamiento de agua durante la interrupción del suministro causada por la emergencia. La cantidad de almacenamiento de agua de emergencia depende de la probabilidad y las posibles consecuencias de una interrupción en el servicio.

Días pico: El tamaño del tanque debe considerar los días anormales que pueden requerir particularmente grandes cantidades de agua. Si bien puede que no sea práctico diseñar un sistema completo para un día pico, el almacenamiento adicional puede proporcionar suficiente agua para el día o los días particulares de mayor demanda.

Pérdidas del sistema de agua existente: Si un sistema

existente se utiliza como parte de un sistema de agua, se deben considerar las pérdidas existentes. Se debe tener en cuenta una cierta cantidad de desechos para el flujo de diseño de todo el sistema, incluido el tanque de almacenamiento de agua. El tanque deberá almacenar esta agua incluso si al final se pierde.

Si alguno de los anteriores es motivo de preocupación en un proyecto, entonces se debe agregar capacidad de almacenamiento al cálculo del almacenamiento mínimo. La capacidad agregada debe basarse en un juicio de ingeniería razonable que evalúe la probabilidad y la gravedad de estos factores.

5.3. Diseño de soporte del tanque

Si un tanque de almacenamiento de agua formará parte del sistema, se debe identificar y diseñar un soporte de tanque adecuado como parte del diseño completo del sistema de agua. Cualquier estructura de soporte elevada para el tanque debe estar diseñada para soportar el peso del tanque a plena capacidad de almacenamiento y para soportar cargas de viento, sismos y de nieve que sean usuales en la ubicación del sistema de agua. Dado que la CDT calculada del sistema de agua depende de la altura del tanque de almacenamiento de agua, es fundamental que la altura permanezca acorde con el cálculo original de la CDT del sistema.

6. Documentación del diseño

(referencia IEC 62253 - 6.5 Documentación)

Todos los diseños de sistemas de agua mediante energía solar deben estar bien documentados para proporcionar una referencia del diseño para todas las partes del proyecto. Cada paso del diseño, incluidos los datos utilizados, las suposiciones realizadas, el proceso de diseño y los cálculos realizados, así como los resultados completos, deben incluirse en la documentación. Esta documentación se usa comúnmente para los siguientes propósitos:

- Verificar ante todas las autoridades gubernamentales y partes involucradas que el diseño cumple con los requisitos y acuerdos relevantes para el sistema de agua mediante energía solar.
- Informar sobre los requerimientos de instalación y construcción del proyecto.
- Servir como un registro duradero para cualquier consulta futura sobre el diseño del sistema.



INSTALACIÓN



C. INSTALACIÓN

7. Seguridad de la instalación y la construcción

La entidad del proyecto asignada a la gestión de la construcción del proyecto es responsable de proporcionar, mantener y hacer cumplir los estándares de seguridad entre todas las partes involucradas en la construcción e instalación.

Además de la seguridad de los trabajadores del proyecto, también se debe abordar y mitigar cualquier preocupación con respecto a seguridad que puedan enfrentar los observadores del proyecto. Las personas de una comunidad rural, especialmente los niños, pueden tener mucha curiosidad con respecto a la construcción de un sistema de agua mediante energía solar. La entidad del proyecto asignada a la gestión del proyecto de construcción es responsable de garantizar la seguridad del público en general en torno al proyecto.

7.1. Seguridad eléctrica

Trabajar con electricidad de manera no segura puede causar quemaduras, descargas eléctricas o electrocución (muerte). El trabajo con electricidad generada mediante energía solar no es diferente y se debe tomar medidas para mantener seguros a los trabajadores. Por otro lado, dado que el tema de esta guía son los sistemas de suministro de agua mediante energía solar, también se debe enfatizar que todos los componentes eléctricos y todo el trabajo en dichos componentes deben protegerse del contacto con el agua. La excepción necesaria a esta regla es cualquier equipo diseñado específicamente para estar en contacto con el agua (como la bomba y el motor de la bomba). Todos los componentes deben manipularse de acuerdo con los requerimientos y recomendaciones de todos los fabricantes.

Otras reglas generales al trabajar con electricidad incluyen:

- Todo el trabajo eléctrico debe llevarse a cabo por parte de electricistas calificados y autorizados.
- Todo el equipo eléctrico debe estar conectado a tierra según los requerimientos y recomendaciones del fabricante.
- Debe evitarse todo contacto con circuitos eléctricos energizados.
- Se debe suponer que todos los dispositivos eléctricos están energizados hasta que una prueba de desconexión sea evidente.
- Se debe desconectar la energía antes de instalar o reparar cualquier componente del sistema eléctrico.
- Si es necesario manipular equipo que está energizado, se deben tomar medidas para proteger al trabajador, como usar solo herramientas con mangos no conductores, mantener las manos y el área de trabajo secas y libres de agua, y usar ropa no conductora (por ejemplo, zapatos y guantes).
- Si alguna vez se derrama agua sobre un componente eléctrico, se debe desconectar inmediatamente la alimentación de energía del componente.
- Por último, se deben cercar todos los contactos, conductores y componentes eléctricos para mantener seguros a los demás.

7.2. Seguridad del trabajo en alturas

Si el diseño del bastidor de la instalación solar incluye colocar los paneles solares a una altura de 1.5 m o más (tomado desde el borde más bajo de los paneles), entonces se debe considerar la seguridad de quienes instalarán los bastidores y los paneles solares. Se debe abordar y mitigar cualquier riesgo de caída de los trabajadores.

8. Supervisión e inspección

Se deben supervisar todas las actividades de instalación y construcción para garantizar una mano de obra de calidad. Asimismo, cada componente del sistema debe inspeccionarse una vez finalizada la instalación o construcción del componente. El propósito es asegurar que cada componente del sistema de agua mediante energía solar se instale de acuerdo con el diseño del sistema y de acuerdo con las especificaciones del fabricante del equipo. Esto incluye, entre otros, la movilización inicial de cada contratista, la marca y modelo de cada componente del sistema, la ruta y ubicación de cada componente, los métodos de instalación y construcción, la protección adecuada de cada componente, la organización del sistema y limpieza, etc. La recomendación de este documento guía es para que el ingeniero responsable, el propietario del sistema de agua o su representante designado proporcionen esta supervisión e inspección.

9. Instalación del sistema de agua

9.1. Todos los componentes del sistema

Toda la construcción e instalación debe llevarse a cabo de acuerdo con todos los códigos y normas locales (ver **2.1. Conformidad del sistema**).

Cada componente del sistema de agua construido debe coincidir con el diseño del sistema de agua. Esto incluye, entre otros, la fuente de agua, el sistema de tuberías, el sistema de tratamiento de agua (si corresponde), la bomba, el tanque de almacenamiento de agua y la ubicación de cada componente. La CDT que requiere el sistema de agua construido por parte de la bomba debe coincidir con la CDT utilizada en la selección de la bomba y el motor del proyecto durante el diseño. Como tal, todo el enrutamiento de la tubería, las longitudes de la tubería, los diámetros de la tubería, los materiales de la tubería (y los factores de rugosidad), los componentes de la tubería, los sistemas de tratamiento, las ubicaciones y las elevaciones de los elementos clave del sistema deben coincidir con aquellos utilizados en el diseño del sistema de agua.

Cualquier desviación del diseño del sistema en la instalación del sistema afectará el rendimiento final del sistema de suministro de agua. Por lo tanto, estas desviaciones pueden ocasionar una producción de agua diaria diferente a la que el sistema estaba destinado a suministrar. Por esa razón, cualquier desviación del diseño, por cualquier motivo, solo se realizará previa consulta y con la aprobación del ingeniero responsable para el proyecto.

Una vez finalizada la instalación completa del sistema de agua, el sitio debe estar limpio y libre de tierra y escombros que puedan haberse acumulado durante la construcción. Asimismo, debe retirarse del sitio todo el equipo de construcción, los desechos de la construcción y los subproductos. La tierra y los escombros acumulados que se dejen sin cuidado en un sitio de sistema de agua mediante energía solar podrían afectar de forma negativa el funcionamiento adecuado del sistema de agua. Esto podría incluir peor calidad de la fuente de agua (si la tierra y los escombros ingresan a la fuente de agua), una producción deficiente de energía de la instalación solar (si el polvo y la tierra se acumulan en los paneles solares) y complicaciones innecesarias en las rutinas de mantenimiento en curso del sistema. Los documentos del contrato de construcción deben asignar la propiedad y la responsabilidad con respecto al retiro del equipo de construcción, así como el retiro y/o disposición de tierra, residuos, escombros de construcción y subproductos.



Tuberías

*Todas las tuberías
soterradas deben tener
el relleno adecuado
para proporcionar el
soporte y protección
correctos a la tubería.*



Foto cortesía de
Water Mission

9.2. Tuberías

Todas las tuberías instaladas como parte del sistema de agua deben estar libres de fugas al finalizar la construcción. Para asegurar el cumplimiento de este requerimiento, se recomienda que todas las tuberías se sometan a pruebas de presión antes de rellenar la zanja de la tubería para verificar si hay fugas. Asimismo, todas las tuberías terminadas deben desinfectarse con cloro y enjuagarse antes de ponerlas en servicio como parte del sistema de suministro de agua.

Toda la tubería debe estar soterrada a un mínimo de 1 metro (3.3 pies) por debajo del nivel del suelo, excepto en las siguientes ubicaciones o circunstancias:

- Transición desde la toma de la fuente de agua
- Transición a cualquier componente de tratamiento de agua del sistema
- Transición a un tanque de almacenamiento de agua
- Transición a cualquier otro componente sobre el nivel del suelo necesario para el diseño del sistema de agua.

Asimismo, si durante la construcción se encuentran rocas u otros obstáculos que causen dificultades o impidan la instalación de acuerdo con el diseño y la especificación, se debe enviar una descripción del obstáculo encontrado y la dificultad subsiguiente al ingeniero de diseño responsable para su revisión. Esto brinda al ingeniero de diseño la oportunidad de analizar cómo una revisión del recorrido de la tubería afectaría el diseño del sistema. El ingeniero de diseño responsable debe otorgar su aprobación antes de que el contratista pueda implementar el cambio. Junto con la aprobación de la revisión, es posible que se consideren necesarias medidas adicionales para proteger la tubería, tales como revestir la tubería en concreto o utilizar una tubería de revestimiento.

Toda la tubería soterrada debe rellenarse de forma adecuada para proporcionar un soporte y protección adecuados a la tubería. Por otro lado, se deben rellenar y compactar todas las excavaciones de zanjas. Si se evidencia alguna fuga en la tubería debido a suelo blando y húmedo a lo largo de la ruta de la tubería y/o agua estancada sobre una tubería (no debido a la lluvia) después de soterrar la tubería, el contratista responsable de la instalación de la tubería debe corregir dichas fugas.

Todas las tuberías sobre el suelo deben instalarse de manera vertical y niveladas. Toda la tubería sobre el nivel del suelo debe estar sujeta y asegurada a los componentes estructurales del sistema de agua (por ejemplo, partes estructurales, plataformas o edificios). Bajo ninguna circunstancia se deberá requerir que la tubería soporte su propio peso o el peso del agua que transporta. Deben instalarse soportes para evitar hundimiento o movimiento de la tubería durante el funcionamiento del sistema de agua.

10. Instalación de la bomba y el motor

10.1. Instalación de la bomba y el motor

La bomba y el motor instalados deben coincidir con la selección realizada durante la fase de diseño. El flujo y CDT que requiere la bomba utilizada deben coincidir con el flujo y CDT utilizados en el diseño. El uso de una bomba y un motor alternativos solo se permitirá con la aprobación del ingeniero de diseño responsable del proyecto.

10.2. Instalación de la bomba

10.2.1. Fuente de agua

La fuente de agua que se use en la construcción del sistema de agua debe ser la fuente que se utilice en el diseño del sistema. El uso de una fuente de agua diferente cambiaría el diseño del sistema de agua mediante energía solar. Por esta razón, no se permitirá el uso de una fuente de agua alternativa por cualquier motivo sin que el ingeniero de diseño responsable del proyecto realice antes la revisión del diseño del sistema de agua.

10.2.1.1. Rendimiento de la fuente

Si no se llevó a cabo la prueba de rendimiento de la fuente de agua antes de seleccionar una bomba y un motor, entonces se debe realizar una prueba de rendimiento antes de instalar la bomba y el motor. Para obtener una presentación completa sobre la prueba de rendimiento, ver **2.3.1. Rendimiento de la fuente**. El rendimiento, o rendimiento permisible, de la fuente debe exceder o ser igual al flujo de diseño. Si el rendimiento, o rendimiento permisible, de la fuente de agua es menor que el flujo de diseño, entonces el ingeniero de diseño responsable del proyecto debe revisar el diseño del sistema de agua, y quizás rediseñarlo, antes de continuar con la instalación.

10.2.1.2. Protección de la fuente

La fuente de agua debe asegurarse contra cualquier posible impacto negativo en la calidad del agua. Esto incluye protección durante la construcción del sistema de agua mediante energía solar, así como medidas para proteger la calidad del agua en el futuro. La degradación de la calidad del agua podría tener posibles efectos negativos en la bomba y el motor (también se debe tener en cuenta que la degradación de la calidad del agua podría requerir un cambio en el método de tratamiento del agua, el cual luego podría modificar el flujo y la CDT del sistema. Esto puede requerir el uso de una bomba, un motor y una configuración de la instalación solar diferentes).

Durante la construcción del sistema de agua mediante energía solar, se debe controlar la escorrentía de lluvia para garantizar que esta no caiga sobre el suelo y materiales de construcción alterado y dentro de la fuente de agua. Esto podría introducir sedimentos, productos químicos, materiales de construcción y otros contaminantes en la fuente de agua. En lugar de ello, la escorrentía de lluvia debe dirigirse más allá de la fuente de agua y/o la fuente de agua debe estar completamente protegida para que no se permita la entrada de ningún flujo de agua desde el sitio de construcción. En el caso de una bomba sumergible en un pozo, la protección adecuada consta de una tapa de pozo de alta calidad con sello sanitario.

Como se mencionó anteriormente, al finalizar la construcción del sistema de agua, el sitio debe estar limpio y libre de tierra y escombros que puedan haberse acumulado debido a la construcción. Asimismo, debe retirarse del sitio todo el equipo de construcción, los desechos de la construcción y los subproductos. El suelo y los escombros acumulados que se dejan sin cuidado en un sitio de sistema de agua mediante energía solar podrían afectar negativamente la calidad del agua de la fuente de agua si se permite su ingreso a dicha fuente de agua.

10.2.2. Requerimientos de instalación de bomba y motor

La bomba y el motor deben instalarse de acuerdo con los requerimientos y recomendaciones del fabricante y de acuerdo con las instrucciones del ingeniero de diseño responsable del proyecto. Esto incluye, entre otros: la ubicación de la bomba en relación con el nivel del agua (o nivel dinámico del agua), los requisitos de carga de aspiración positiva neta de la bomba, todos los requerimientos de cableado de la bomba, cualquier requerimiento de sensor de funcionamiento en seco, cualquier requerimiento de cebado de la bomba, cualquier medida de protección y futuras medidas de mantenimiento.

Todas las conexiones de cables hacia el motor deben instalarse de acuerdo con los requerimientos y recomendaciones del fabricante, incluido el tipo de cable y la ubicación de las conexiones de terminales.

10.3. Instalación del equipo auxiliar de bomba y motor

Todos los componentes auxiliares instalados junto con la bomba y el motor, incluidos los interruptores de desconexión (o disyuntores), unidades de control, inversores, interruptores de flotador y sensores de funcionamiento en seco (o interruptores), deben coincidir con las selecciones realizadas en el diseño del sistema. El uso de cualquier alternativa solo se permitirá con la aprobación del ingeniero de diseño responsable del proyecto.

Por otro lado, todo el equipo auxiliar debe instalarse de acuerdo con los requerimientos y recomendaciones del fabricante del componente y de acuerdo con las instrucciones del ingeniero de diseño responsable del proyecto. Todos los componentes suplementarios deben sujetarse firmemente a una superficie estructural (por ejemplo, la pared interior de un edificio) en la orientación adecuada de acuerdo con los requerimientos y recomendaciones del fabricante. Todas las conexiones de cables a estos componentes deben cumplir con los requisitos y recomendaciones del fabricante, incluido el tipo de cable y la ubicación de la conexión de terminales. Todos los sujetadores de cables que se utilizan en el cableado que ingresa o sale de un componente deben ajustarse de manera adecuada para protegerlos contra las aberturas no protegidas del componente. Todos los componentes eléctricos deben estar debidamente conectados a tierra según los requerimientos del fabricante del componente.

10.4. Cableado de los equipos de motor y bomba auxiliares

(Nota: Consultar 7 Seguridad de la instalación y la construcción para obtener información con respecto a la seguridad de todas las tareas de construcción eléctrica).

Todo el cableado eléctrico debe instalarse de conformidad con todos los códigos eléctricos relevantes para la ubicación del proyecto (como los códigos IEC o NEC). Todo el cableado utilizado junto con la bomba, el motor y el equipo auxiliar, incluido el cableado entre el motor y la unidad de control, el cableado asociado con un interruptor de flotador o un sensor/interruptor de funcionamiento en seco, así como todo el cableado de conexión a tierra, debe ser conforme con el cable identificado en el diseño del sistema (ver **4.3. Requerimientos de cableado eléctrico**). El uso de cualquier alternativa solo se permitirá con la aprobación del ingeniero de diseño responsable del proyecto.

Todo el cableado soterrado debe estar clasificado para soterrado directo y debe soterrarse a un mínimo de 1 metro (3.3 pies) por debajo del nivel del suelo. Todo el cableado soterrado que no esté clasificado para soterrado directo debe estar contenido en un conducto con clasificación eléctrica. Por otro lado, se deben rellenar y compactar todas las excavaciones de zanjas. Si se encuentran rocas u otros obstáculos que causen dificultades o impidan la instalación de acuerdo con el diseño y la especificación, se deberá enviar una descripción del obstáculo encontrado y la dificultad subsiguiente al ingeniero de diseño responsable para su revisión. El ingeniero de diseño responsable debe otorgar su aprobación antes de que el contratista realice cualquier desviación del diseño (y especificaciones de construcción). Junto con la aprobación de la revisión, es posible que se consideren necesarias medidas adicionales para proteger los cables y/o el conducto, tales como revestimiento de concreto o utilizar una tubería de revestimiento.

Todo el cableado no soterrado debe estar contenido en un conducto eléctrico (excepto la sección vertical de cable en un pozo en el caso de una bomba sumergible mencionado anteriormente). Todo conducto sobre el suelo debe instalarse de manera vertical y nivelado. Todos los conductos deben estar firmemente sujetos y asegurados a los componentes estructurales del sistema de agua (por ejemplo, partes estructurales, plataformas o superficies de edificios). Bajo ninguna circunstancia se debe instalar un conducto de manera que soporte su propio peso o el peso del cableado que lleva. Se debe instalar soportes para evitar el hundimiento o movimiento del conducto. Proteger todos los extremos de los conductos no cerrados ante el ingreso de agua, insectos u otros materiales no deseados.



Foto cortesía de Water Mission



Instalación y construcción del sistema FV

Cableado de la instalación solar



Photos courtesy of Water Mission

Todo el cableado debe estar conectado de forma correcta. Bajo ninguna circunstancia el cable desnudo debe quedar expuesto. En consecuencia, los extremos de los cables pelados deben mantenerse al mínimo para poder realizar una conexión adecuada. Las longitudes peladas de los cables desnudos se deben mantener al mínimo en las conexiones realizadas en el interior de equipos eléctricos o componentes y cajas asociados. Utilice empalmes y conectores del tamaño adecuado de acuerdo con el tamaño y tipo de cable.

11. Instalación y construcción de sistemas FV

(referencia IEC 60364-7-712)

11.1. Panel solar

El panel solar que se utilice en la construcción de la instalación solar debe coincidir con la clasificación nominal y las especificaciones seleccionadas durante el diseño (ver **4.1.1. Selección de panel solar**). El uso de un panel solar alternativo solo se permitirá previa aprobación del ingeniero de diseño responsable del proyecto. Todos los paneles de la instalación solar deben cumplir las mismas especificaciones, incluido el voltaje del punto de máxima potencia (V_{mpp}), la corriente del punto de máxima potencia (I_{mpp}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), el voltaje de cortocircuito (I_{sc}), el coeficiente de temperatura en V_{oc} ($TC V_{oc}$) y la temperatura normal de funcionamiento de la célula (NOCT). Asimismo, las dimensiones de los paneles solares instalados deben coincidir con las dimensiones necesarias para cumplir con el diseño del bastidor de la instalación solar (ver **11.5. Bastidor de instalación solar**).

Cualquier panel solar seleccionado debe cumplir con las Normas Internacionales IEC:

- IEC 61215 Módulos fotovoltaicos (FV) de silicio cristalino para uso terrestre. Calificación de diseño y aprobación de tipo.
- IEC 61646 Módulos fotovoltaicos (FV) de lámina delgada para uso terrestre. Calificación de diseño y aprobación de tipo.
- IEC 61730-1 Calificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV). Parte 1: Requisitos de construcción.
- IEC 61730-2 Calificación de la seguridad de los módulos fotovoltaicos (FV). Parte 2: Requisitos de prueba.

11.2. Instalación solar

La configuración de la instalación solar (es decir, el número de paneles solares en serie y el número de cadenas en paralelo) debe coincidir con la configuración del diseño (ver **4.1.2. Configuración de una instalación solar**). El ángulo de inclinación de la instalación solar y la dirección cardinal de la instalación solar deben coincidir con los requerimientos de diseño (ver **4.2. Requerimientos adicionales de instalación**). Cualquier desviación en la configuración, el ángulo de inclinación o la dirección cardinal del panel solar, por cualquier motivo, requerirá la revisión y aprobación del ingeniero de diseño responsable del proyecto.

La totalidad del diseño y de la instalación de la instalación solar debe cumplir con los requisitos de diseño IEC 62548 para instalaciones fotovoltaicas (FV).

11.3. Cableado de la instalación solar

(referencia IEC 60364-7-712)

Todo el cableado utilizado en la construcción de la instalación solar, incluido el cableado entre los paneles solares individuales, el cableado desde la instalación solar a la bomba y el motor, así como todo el cableado de conexión a tierra, debe estar en conformidad con el cable identificado en el diseño del sistema (ver **4.1. Diseño de instalación solar**). El uso de cualquier alternativa solo se permitirá con la aprobación del ingeniero de diseño responsable del proyecto.

Todo el cableado soterrado debe estar clasificado para soterrado directo y debe soterrarse a un mínimo de 1 metro (3.3 pies) por debajo del nivel del suelo. Todo el cableado soterrado que no esté clasificado para soterrado directo debe estar contenido en un conducto con clasificación eléctrica. Por otro lado, se debe rellenar y compactar todas las excavaciones de zanjas. Si se encuentran rocas u otros obstáculos que causen dificultades o impidan la instalación de acuerdo con el diseño y la especificación, se deberá enviar una descripción del obstáculo encontrado y la dificultad

subsiguiente al ingeniero de diseño responsable para su revisión. El ingeniero de diseño responsable debe otorgar su aprobación antes de que el contratista realice cualquier desviación del diseño (y especificaciones de construcción). Junto con la aprobación de la revisión, es posible que se consideren necesarias medidas adicionales para proteger los cables y/o el conducto, tales como revestimiento de concreto o utilizar una tubería de revestimiento.

Todo el cableado no soterrado debe estar contenido en un conducto eléctrico (excepto las secciones de paneles solares individuales que se describen a continuación). Todo conducto sobre el suelo debe instalarse de manera vertical y nivelado. Todos los conductos deben estar firmemente sujetos y asegurados a los componentes estructurales del sistema de agua (por ejemplo, elementos del bastidor solar o superficies de edificios). Bajo ninguna circunstancia se debe instalar un conducto de manera que soporte su propio peso o el peso del cableado que lleva. Se debe instalar soportes para evitar el hundimiento o movimiento del conducto. Todos los extremos de los conductos no cerrados deben protegerse del ingreso de agua, insectos u otros materiales no deseados.

El único cable cubierto no soterrado y sin conducto se encontrará en las secciones horizontales a las derivaciones de los paneles solares individuales. Este cableado debe mantenerse directamente por debajo de los paneles solares y sujetarse con firmeza a los marcos de los paneles solares y al bastidor de la instalación solar. Las secciones verticales de cable desde el bastidor de paneles solares hasta el suelo deben estar contenidas en un conducto eléctrico.

Todas las secciones del cableado deben estar conectadas de forma correcta. Bajo ninguna circunstancia el cable desnudo debe quedar expuesto. En consecuencia, los extremos de los cables pelados deben mantenerse al mínimo para realizar una conexión adecuada. Las longitudes peladas de los cables desnudos se deben mantener al mínimo en las conexiones realizadas en el interior de equipos eléctricos o componentes y cajas asociados.

Los conectores que se utilicen para conectar las derivaciones del panel solar al cableado de la instalación solar deben ser de la misma marca y modelo que los conectores que vienen instalados en el panel solar por el fabricante del panel solar. El uso de cualquier alternativa solo se permitirá con la aprobación del ingeniero de diseño responsable del proyecto. La instalación de un conector en un cable siempre debe realizarse de acuerdo con los requerimientos y recomendaciones del fabricante del conector.

La instalación solar debe estar debidamente conectada a tierra según los requerimientos de diseño y las recomendaciones del fabricante del panel solar.

Todo el cableado debe cumplir con IEC 60364-7-712, 60947-1 y 62253.

11.4. Componentes suplementarios de la instalación solar

Todos los componentes auxiliares utilizados en la construcción de la instalación solar, incluidos todos los interruptores de desconexión (o disyuntores), cajas de conexiones y otros elementos que conduzcan energía, deben ser conformes con los componentes identificados en el diseño del sistema (ver **4.4. Identificar los componentes complementarios de la instalación solar**). El uso de cualquier alternativa solo se permitirá con la aprobación del ingeniero de diseño responsable del proyecto.

Todos los componentes auxiliares deben estar correctamente orientados y fijados con firmeza a una superficie estructural (por ejemplo, la pared interior de un edificio) de acuerdo con los requerimientos y recomendaciones de los fabricantes. Todas las conexiones de cables a estos componentes deben estar conformes con los requerimientos de diseño y las recomendaciones de los fabricantes. Todos los sujetadores de cables que se utilizan en el cableado que ingresa o sale de un componente deben ajustarse de manera adecuada para protegerlos de aberturas no protegidas en el componente. Todos los componentes eléctricos deben estar debidamente conectados a tierra de acuerdo con los requerimientos de diseño y las recomendaciones del fabricante del componente.

11.5. Bastidor de instalación solar

El bastidor de la instalación solar debe adaptarse a los requerimientos establecidos en **4.5. Diseño de bastidor de instalación solar** (incluida la configuración, el ángulo de inclinación y la dirección cardinal). El bastidor se deberá construir según el diseño del sistema FV (ver **4. Diseño de sistema FV**). Esto incluye la ubicación, la altura de los paneles solares sobre el suelo, las medidas para prevenir o resistir la corrosión del bastidor, las medidas de seguridad para disuadir el robo y el vandalismo de los paneles solares y cualquier otro plan de mantenimiento futuro. Cualquier desviación del diseño solo se permitirá con la aprobación del ingeniero de diseño responsable del proyecto.

Como se mencionó en **4.5.2. Otras consideraciones del diseño de bastidores**, las partes estructurales del bastidor deben estar pintadas, galvanizadas o hechas de un material que resista o evite el óxido, la corrosión y otros daños. Esto incluye proporcionar medios para evitar que el agua ingrese al interior de las partes estructurales huecas que podrían originar la oxidación. De manera similar, todos los sujetadores y equipo físico deben estar compuestos de material resistente a la corrosión.

12. Construcción del almacenamiento de agua

12.1. Instalación del tanque de almacenamiento

Si un tanque de almacenamiento de agua es parte del diseño del sistema de agua, entonces el tanque de almacenamiento de agua debe coincidir con lo que se especificó en el diseño, incluyendo el volumen y la ubicación (ver **5. Almacenamiento de agua**). El uso de cualquier alternativa solo se permitirá con la aprobación del ingeniero de diseño responsable del proyecto. Los tanques de almacenamiento de agua instalados como parte del sistema de agua deben estar libres de fugas al finalizar la construcción. Asimismo, los tanques de almacenamiento de agua finalizados deben desinfectarse con cloro y enjuagarse antes de ponerlos en servicio como parte del sistema de suministro de agua.

12.2. Construcción de la estructura de soporte del tanque

Todas las estructuras utilizadas para soportar el tanque de almacenamiento de agua deben construirse de acuerdo con el diseño del sistema de agua (ver **5.3. Diseño de soporte del tanque**). Cualquier desviación del diseño solo se permitirá con la aprobación del ingeniero de diseño responsable del proyecto.



Foto cortesía de Water Mission



PUESTA EN MARCHA



La estructura debe proporcionar una superficie nivelada para sostener el tanque. Si se va a usar hormigón como parte de la estructura de soporte del tanque, se recomienda que se deje endurecer el hormigón durante un mínimo de siete días antes de colocar el tanque de almacenamiento en la estructura.

D. PUESTA EN MARCHA

13. Prueba del sistema

(referencia IEC 62253 – 6.6 Verificación del diseño del sistema de bombeo FV con respecto al volumen de agua diario)

Una vez finalizada la instalación de todos los componentes principales del proyecto, la persona que instaló el componente deberá poner en marcha cada componente de la siguiente manera. En presencia del ingeniero de diseño responsable o el representante del propietario, el componente se pondrá en operación y deberá funcionar de acuerdo con el diseño de dicho componente. Esto incluye la puesta en servicio del sistema FV, la bomba y el motor, las tuberías y el almacenamiento de agua. La persona que instaló dicho componente rectificará cualquier incumplimiento para cumplir con el rendimiento requerido. Luego, debe repetirse la puesta en marcha del componente. Todos los componentes deben funcionar de acuerdo con el diseño del sistema. IEC 62253 permite una incertidumbre máxima del 3% en la medición utilizada para evaluar el rendimiento.

13.1. Prueba del sistema FV

Se deben realizar las siguientes pruebas y se deben incluir los resultados en el reporte de finalización de la persona que realizó la instalación:

- Medir el voltaje que ingresa al controlador del motor de la bomba desde la instalación solar. El voltaje medido debe estar dentro del 5% según el diseño.
- Si se ha instalado un interruptor de desconexión (o disyuntor) en la instalación solar, colocar en la posición de desconexión (o circuito roto) y medir el voltaje que ingresa al controlador del motor de la bomba desde la instalación solar. El voltaje medido debe ser cero.

14. Documentación

(referencia IEC 62253 - 6.5 Documentación)

Se debe proporcionar la documentación final al propietario del sistema de agua mediante energía solar antes de que el proyecto se considere finalizado y listo para su plena operación. Esta documentación deberá incluir:

- a. Documentación de diseño (ver **6. Documentación del diseño**)
- b. Registros de instalación
- c. Manual de operación y mantenimiento
- d. Información de garantía

Los registros de instalación consisten en gráficos que representan el sistema completo, incluida la ubicación, la identificación, los tamaños y la ruta (incluidos, entre otros, la bomba, el motor, los controles de la bomba, la instalación solar, el cableado, las tuberías, los tanques de almacenamiento de agua, etc.). Todas las diferencias entre la documentación de diseño y la documentación de instalación se deben anotar de manera clara, ya que la documentación de instalación es el registro real de todos los componentes instalados.

El manual de operación y mantenimiento debe cubrir los siguientes temas de una manera clara y fácil de comprender:

- El funcionamiento estándar de todos los equipos, incluidas las medidas para la solución de problemas y la interpretación de los indicadores de estado y error.
- Instrucciones para corregir o reinstalar después de errores o fallas del sistema.
- Instrucciones sobre todas las medidas de seguridad necesarias.
- Instrucciones sobre todas las medidas de mantenimiento, incluidos los programas de servicio recomendados.
- Todas las referencias necesarias a los registros de instalación.

La información de garantía proporcionada debe incluir todas las garantías del equipo que brindan los fabricantes de los equipos. Esto puede incluir, entre otros, la bomba, el motor, los controles de la bomba, los paneles solares, etc. Por lo general, el proveedor del producto es responsable de administrar las garantías del fabricante del equipo. Las garantías típicas de los equipos son:

- Paneles solares: 25 años para rendimiento y 10 años para defectos de fábrica
- Equipos de acondicionamiento de energía e inversores: 5 años
- Bombas y motores: 2 a 5 años

Asimismo, se deben proporcionar garantías sobre la instalación y construcción de los componentes principales del proyecto. Esta consistiría en una garantía sobre los materiales, los componentes y la calidad de la mano de obra. La duración de las garantías que cubren la instalación y la construcción debe acordarse entre el propietario del sistema de agua mediante energía solar y la parte responsable de la instalación o construcción de cada componente. Se recomienda una garantía de dos años a partir de la fecha final de puesta en servicio del sistema (la duración requerida mínima de la garantía es de un año).

15. Información de reemplazo de equipos o repuestos

Se debe proporcionar al propietario del sistema de agua mediante energía solar la información necesaria para adquirir y reemplazar los componentes principales del sistema para su uso futuro. Todas las partes deben comprender que es posible que la información sobre adquisición y reemplazo se haya vuelto obsoleta, cuando haya transcurrido la vida útil de los componentes y equipos. Sin embargo, es preferible tener información obsoleta que ninguna información.

Por otro lado, se recomienda que el propietario del sistema de agua mediante energía solar considere adquirir repuestos de los componentes principales del equipo en el momento de la puesta en servicio inicial del sistema, en caso la futura adquisición de esos artículos pueda representar un problema. En particular, este es el caso en países o regiones donde las cadenas de suministro de los componentes de un sistema de agua mediante energía solar no son estables o no están presentes. Sin embargo, también debe considerarse la adquisición de una pieza de equipo que se reservará para una fecha de uso futura de acuerdo a la importancia de dicho equipo para los requisitos futuros del sistema como conjunto. Por ejemplo, si se compra una segunda bomba del mismo modelo que aquella instalada en el sistema original con el fin de conservarla para una fecha futura cuando la bomba actual ya no funcione, dicha bomba deberá ser suficiente

para suministrar para el crecimiento potencial de la demanda diaria de agua del proyecto debido al aumento de la población o al aumento del uso de agua. Por lo tanto, se debe evaluar con cuidado cualquier adquisición de componentes de repuesto que se utilizará en el futuro, pero considerar la adquisición de componentes de repuesto es lo que se recomienda en esta guía.

E. TEMAS SUPLEMENTARIOS

16. Introducción a la operación y mantenimiento de sistemas de agua mediante energía solar

El enfoque de este documento guía es el diseño y la instalación. Sin embargo, hay otros temas dentro de los sistemas de agua mediante energía solar que son de gran importancia. Uno de estos es la operación y el mantenimiento. Para reconocer su importancia, se incluye la siguiente sección como una descripción general de las funciones y responsabilidades que son necesarias para operar y mantener de manera sostenible los sistemas de agua mediante energía solar desde una perspectiva técnica y financiera.

Antes de hablar sobre las actividades en curso que se requieren para operar y mantener los sistemas de agua mediante energía solar, es importante reconocer que la viabilidad de la operación y el mantenimiento adecuados de estos sistemas depende de manera crítica de los acuerdos de prestación de servicios que se hayan implementado, incluso más que de la durabilidad de la propia tecnología. La pregunta fundamental que debe abordarse antes de la puesta en servicio de un sistema de agua mediante energía solar es: ¿quién será el propietario de los activos del sistema de agua a largo plazo? La respuesta a esta pregunta determinará quién tiene la responsabilidad de mantener el sistema y la autoridad para delegar esta responsabilidad. La división de todas las responsabilidades en curso, ya sean técnicas o no técnicas, debe estar articulada de manera clara en los acuerdos contractuales, así como también todos los actores deben tener la capacidad de cumplir con sus compromisos. Esto significa que los actores comunitarios, tales como los comités de usuarios del agua, deberán encontrarse debidamente capacitados y profesionalizados. Asimismo, es posible que sea necesario delegar algunas responsabilidades a entidades del sector privado más capacitadas. Los acuerdos de prestación de servicios también deben establecer y mantener períodos de garantía y responsabilidad por defectos, idealmente para dos o más años (el requisito mínimo es de un año). Dichas

coordinaciones también deberán planificar la eventual renovación y reemplazo de equipo. Más importante aún, debe existir un plan viable para cubrir los costos continuos mediante una combinación de fondos provenientes de tarifas, impuestos y transferencias.

Por otro lado, existen algunos problemas técnicos comunes que experimentan los sistemas de agua mediante energía solar, tales como vandalismo, robo y fallas eléctricas. La operación y el mantenimiento adecuados pueden ayudar a evitar o tratar estos problemas. Como se mencionó anteriormente en este documento guía, se pueden hacer planes durante el diseño de la instalación solar para ayudar a garantizar que la operación y el mantenimiento sean exitosos (ver **4.5.2. Otras consideraciones de diseño de bastidor**, **4.5.3. Seguridad de los paneles solares** y **4.7. Mantenimiento de la instalación solar**).

Una buena práctica consiste en desarrollar un plan de operaciones diario, de modo que todos los actores tengan un claro entendimiento sobre qué actividades deberán realizarse y con qué frecuencia. El mantenimiento típico del sistema consiste en actividades relativamente simples que producen resultados significativos cuando se llevan a cabo de forma regular. Por lo general, estas actividades incluyen proporcionar seguridad, limpiar la instalación solar, monitorear el desempeño, cobrar los pagos o tarifas de los usuarios, hacer reparaciones menores y mantener los registros. Estas actividades se llevan a cabo de forma diaria, semanal o con menor frecuencia. Otras actividades se llevarán a cabo de manera trimestral, anual o una vez durante el tiempo de vida del sistema. Esto puede incluir diagnósticos y reparaciones complejas, reemplazo de componentes y problemas de garantía. Es de vital importancia mantener un buen registro del volumen de agua producida, las tarifas cobradas, los cambios en los niveles de las aguas subterráneas, las reparaciones realizadas y otras actividades. Esta información se puede utilizar para prevenir conflictos, indicar la sostenibilidad de las extracciones de agua subterránea y, por lo general, es necesaria para cumplir con las garantías del producto. No realizar estas actividades de manera rutinaria ocasionará costosas reparaciones que podrían haberse evitado y eventuales fallas del sistema.

Las actividades de mantenimiento continuo más simples, pero que tienen el mayor impacto, y que están asociadas con los sistemas de energía solar son la limpieza de rutina de los paneles solares y el mantenimiento del sitio alrededor de la instalación. Esto se hace para asegurar que no se proyecte sombra sobre la instalación en ningún momento durante el día. Por otro lado, la potencia de salida de la instalación disminuye debido a la acumulación de polvo (ver **4.1.3. Pérdidas de energía**). Asimismo, una instalación que experimenta sombras durante ciertos momentos del día debido a árboles, edificios u otras obstrucciones no producirá la cantidad total de energía que es capaz de producir (ver **4.1.3. Pérdidas de energía**).



Foto cortesía de
Water Mission

17. Sistemas de agua mediante energía solar en respuesta a desastres humanitarios

Después de un desastre, las tareas más importantes, después de la búsqueda y el rescate, incluyen las categorías de atención médica, refugio, comida y agua. Cuando se trata de proporcionar agua segura para las víctimas de desastres y trabajadores humanitarios, las soluciones más comunes son los camiones de agua y la producción de agua alimentada por un generador. Sin embargo, los sistemas de agua mediante energía solar también representan una opción viable en la respuesta humanitaria ante desastres. La siguiente sección aborda algunas de las razones por las que se deben considerar las aplicaciones de energía solar.

La primera razón a considerar es que los sistemas de agua mediante energía solar por lo general tienen costos operativos y de mantenimiento más bajos. Estos costos suelen ser más bajos porque los sistemas de energía solar no utilizan combustible ni petróleo. Después de un desastre, el combustible suele escasear o es difícil de conseguir. Los disturbios civiles, la infraestructura dañada y las barreras físicas dificultan el transporte y la entrega de combustible. Si el combustible se encuentra accesible, a menudo es posible que tenga un alto costo debido al suministro limitado y a la dificultad en la entrega. Asimismo, antes de que los servicios de respuesta de ASH puedan trasladarse a otras comunidades y ubicaciones, deben determinar quién será el responsable de la operación técnica y la sostenibilidad financiera del sistema de agua. Si los costos operativos son altos debido a los

costos del combustible, esto puede ser una carga difícil de sobrellevar para una comunidad en recuperación o para otras organizaciones de ayuda. El uso de sistemas de agua mediante energía solar elimina estos costos. Por otro lado, el cuidado y la resolución de problemas del generador requieren mucho tiempo y atención. Esto también se suma a los costos de mantenimiento y requiere mucho tiempo de los miembros de la comunidad, el cual podrían usar en otras áreas importantes después de un desastre. En general, los requisitos y costos de mantenimiento tienden a ser más bajos para los sistemas solares en comparación con los sistemas de generadores.

La siguiente razón a considerar es la practicidad del suministro de energía en un sistema de agua. Cuando los sistemas superan un cierto tamaño, se debe tener en cuenta la movilidad del equipo. Por lo general, es más sencillo trasladar los paneles solares a un sitio en comparación a un gran generador. Por ejemplo, un generador de 50 kW podría pesar más de 1,500 libras (700 kg) y requeriría un camión para su transporte. En cambio, los paneles solares se pueden cargar a un sitio de forma individual. Un equipo puede cargar 50kw de paneles, lo cual es especialmente importante en sitios de difícil acceso después de un desastre. Por otro lado, los sistemas solares se pueden escalar según el proyecto. Esto permite una mayor flexibilidad entre las distintas comunidades. Por último, los paneles solares son silenciosos y no emanan gases. Por lo tanto, no generan ruido ni contaminación del aire como lo hace un generador. Esto puede ser especialmente valioso después de un desastre, ya que las personas están en alerta máxima y posiblemente duerman en campamentos o centros de ayuda cerca del equipo del sistema de agua.

Por último, se debe considerar el valor a largo plazo y la sostenibilidad de los sistemas de agua mediante energía solar. Los generadores, en especial aquellos que son pequeños y los que están equipados con ruedas, tienden a ser blanco de robos. Los paneles solares se pueden asegurar en un marco soldado, lo cual hace que sea difícil robar sin llevarse todo el marco, el cual es pesado y generalmente está atornillado a una estructura. Asimismo, la vida útil de un sistema de energía solar es más larga que la de un generador. Por lo tanto, es usual tener una vida útil más prolongada incluso mucho después de la recuperación después del desastre.

Los sistemas de agua mediante energía solar pueden ser una excelente opción para que las personas tengan agua segura de manera rápida durante una respuesta humanitaria a un desastre. Cada desastre será diferente, pero deben considerarse los costos de operación y mantenimiento, la practicidad y la sostenibilidad al determinar cómo alimentar el sistema de agua.

F. REFERENCIAS

Alternative Energy Tutorials. (2017). Conectando los paneles solares. Extraído de

<http://www.alternative-energy-tutorials.com/energy-articles/connecting-solar-panels-together.html>

Arnalich, S. (2010). *Suministro de agua por flujo de gravedad* (1st English ed.). Arnalich Water and Habitat.

Comisión Europea. (2017). *Sistema de información geográfica fotovoltaica*. Extraído de

http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html

Grundfos. (2004). *Manual de la bomba*. Bjerringbro, Dinamarca.

Grundfos. (1999). *Manual de ingeniería de sistemas de agua*. Bjerringbro, Dinamarca.

Grundfos. (2008). *Manual de ingeniería SP*. Bjerringbro, Dinamarca.

IEC. (2017). IEC 60364-7-712 Norma internacional. Instalaciones eléctricas de baja tensión. Parte 7-712: Requisitos para instalaciones o emplazamientos especiales. Sistemas de suministro de energía solar fotovoltaica (FV), (edición 2.0, 2017-04). Ginebra, Suiza: Oficina Central de IEC.

IEC. (2004). IEC 62124 Norma internacional. Sistemas autónomos fotovoltaicos (FV). Verificación del diseño (Primera edición, 2004-10). Ginebra, Suiza: Oficina Central de IEC.

IEC. (2011). IEC 62253 Norma internacional. Sistemas de bombeo fotovoltaico. Clasificación de diseño y mediciones de rendimiento (edición 1.0, 2011-07). Ginebra, Suiza: Oficina Central de IEC.

IEC. (2016). IEC 62548 Norma internacional. Instalaciones fotovoltaicas (FV): Requerimientos de diseño (edición 1.0, 2016-09). Ginebra, Suiza: Oficina Central de IEC.

ISO. (2003). ISO 14686:2003 Determinaciones hidrométricas. Pruebas de bombeo para pozos de agua. Consideraciones y lineamientos de diseño, rendimiento y uso (primera edición 2003-07-15). ISO.

Mihelcic, J. R., Fry, L. M., Myre, E. A., Phillips, L. D., & Barkdoll, B. D. (2009). Guía de campo de ingeniería ambiental para trabajadores de desarrollo. Reston, VA: Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles.

Predicción de Recursos de Energía Mundial de la NASA (2019). Lector de acceso de datos POWER. Extraído de <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Solar World. (2016, March 23). *Limpieza y mantenimiento de módulos fotovoltaicos SolarWorld*. Boletín técnico (Número 1036). Extraído de <http://www.solarworld-usa.com/~media/www/files/technical-bulletins/solar-panel-cleaning-and-maintenance.pdf>

El Proyecto Esfera. (2018). *Acta constitutiva humanitaria y estándares mínimos en respuesta humanitaria* (4ta ed.). Ginebra, Suiza: Publicación de acción práctica.

UNICEF/Fundación Skat. (2016). *Perforación profesional de pozo de agua: Una nota guía de UNICEF. Asociaciones de perforación rentables de la red de suministro de agua rural: UNICEF y Fundación Skat*.

UNICEF/Fundación Skat. (2018). *Perforación de pozo – Planificación, contratación y manejo: Un kit de herramientas de UNICEF. Asociaciones de perforación rentables de la red de suministro de agua rural: UNICEF y Fundación Skat*.

Alto Comisionado de las Naciones Unidas para los Refugiados. (setiembre de 2018). *Manual de ASH de ACNUR: Guía práctica para ambientes de refugiados* (4ta ed.). Ginebra, Suiza: ACNUR.

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). (Junio de 2011). Planificación para un suministro de agua potable de emergencia (Informe técnico N° EPA 600/R-11/054). Extraído de https://www.epa.gov/sites/production/files/201503/documents/planning_for_an_emergency_drinking_water_supply.pdf

Water Mission. (2013). *Revisión del uso y accesibilidad al agua: Implicancias para la planificación financiera de suministros de agua rurales*. Extraído de <https://whconference.unc.edu/files/2014/01/armstrong2.pdf>

Grupo del Banco Mundial, ESMAP y Solargis. (2020, febrero). Atlas solar global. Extraído de <globalsolaratlas.info/map>

Howard, G. & Bartram, J. (2003). *Cantidad, mantenimiento, nivel y salud del agua doméstica*. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud. Extraído de http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/67884/1/WHO_SDE_WSH_03.02.pdf

Adams, J., Bartram, J., & Chartier, Y. (2008). *Estándares de salud ambientales esenciales en el cuidado de la salud*. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud. Extraído de https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/ehs_hc/en/

G. OTROS RECURSOS DEL SISTEMA DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA SOLAR

Global Sustainable Energy Solutions. (2019). *Solar Water Pumping Systems: System Design, Selection and Installation Guidelines*. The Pacific Power Association (PPA) and the Sustainable Energy Industry Association of the Pacific Islands (SEIAPI).

GRID Nepal and Center for Energy Studies Institute of Engineering, TU. (2014, October). *Training Manual Solar PV Pumping System*. Kathmandu, Nepal: Government of Nepal, Ministry of Science, Technology and Environment (MoSTE), Alternative Energy Promotion Center (AEPIC).

International Organization for Migration (IOM) - Global Solar & Water Initiative. (2018). *Solar Water Pumping Miniguide*. IOM.

Practica Foundation. (2018). *Solar Pumping For Village Water Supply Systems*. The Netherlands: Practica Foundation.

Shehadeh, Nader Hajj. (2015, May 19). *Solar Powered Pumping in Lebanon, A Comprehensive Guide on Solar Water Pumping Solutions*. UNDP and Swiss Agency for Development and Cooperation SDC.

El Banco Mundial. (2018). *Bombeo solar. Lo básico*. Washington, DC, Estados Unidos: Banco Internacional de Reconstrucción y Desarrollo/Banco Mundial.

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS). (Octubre de 2010). *Nota técnica No. 28, Portland, Oregon, Diseño de sistemas pequeños fotovoltaicos (FV) de bombeo de agua mediante energía solar*. Washington, DC, Estados Unidos: USDA, NRCS.



ANEXOS



H. ANEXOS

Anexo A.

PASOS BÁSICOS PARA DISEÑAR UN SISTEMA DE AGUA MEDIANTE ENERGÍA SOLAR	
Hay cinco pasos básicos involucrados en el diseño de un sistema de agua mediante energía solar.	
PASO 1 Calcular la demanda diaria de agua para el proyecto.	
Referencia en el documento guía:	2.2. Demanda diaria de agua del proyecto
Pregunta a responder:	¿Cuál es la demanda de agua que el sistema de agua mediante energía solar está diseñado para producir?
PASO 2 Determinar el rendimiento de la fuente de agua disponible para el sistema de agua mediante energía solar.	
Referencia en el documento guía:	2.3. Fuente de agua
Pregunta a responder:	¿El rendimiento de la fuente de agua cumple o excede la demanda calculada en el Paso 1?
PASO 3 Determinar la carga dinámica total (CDT) del sistema de agua en el flujo de diseño elegido.	
Referencia en el documento guía:	2.4. Disposición del diseño del sistema de suministro de agua 3.1. Flujo de diseño
Pregunta a responder:	¿Cuál es el flujo de diseño y la CDT que deberá cumplir la bomba?
PASO 4 Seleccionar una bomba y un motor.	
Referencia en el documento guía:	3.2. Selección de bomba y motor (o selección del conjunto de bomba fotovoltaica) 3.3. Energía requerida 3.4. Especificaciones del fabricante
Pregunta a responder:	¿Cuáles son los requisitos de potencia del motor de la bomba para lograr el rendimiento deseado de la bomba?
PASO 5 Diseñar el sistema FV.	
Referencia en el documento guía:	4. Diseño de sistema FV
Pregunta a responder:	¿Cómo se debe configurar la instalación solar para suministrar la energía requerida por el motor de la bomba?
Como muestra este documento guía, cada sistema individual puede tener consideraciones específicas que deben tomarse en cuenta en los detalles del diseño del sistema. Sin embargo, estos cinco pasos constituyen los componentes principales de cada sistema y ningún diseño de sistema de agua mediante energía solar está completo sin ellos.	

Anexo B.

Ejemplo: Calcular la demanda diaria de agua del proyecto

(referencia IEC 62253 – 6.2 Datos del cliente, d. demanda de agua)

Una comunidad en la zona rural de Kenia actualmente recolecta agua para beber de tres fuentes: un pozo equipado con una bomba manual, un río y arroyos estacionales que no tienen flujo durante la estación seca. La población de la comunidad ha crecido y siempre hay largas colas para usar la bomba manual. Asimismo, el río no es de fácil acceso para todos, ya que se encuentra alejado en el extremo oeste de la comunidad. Se ha puesto a disposición una fuente de financiación para diseñar e instalar un sistema de agua mediante energía solar para atender mejor las necesidades de agua segura bebible de la comunidad.

La comunidad está compuesta por 350 hogares y el número promedio de personas por hogar es de seis. Asimismo, hay una escuela en la comunidad con 700 estudiantes y los 700 estudiantes residen en la comunidad.

Luego de debatir las necesidades de agua con los líderes comunitarios, se determinó que el uso diario de agua por persona tiene el siguiente patrón.

USO DEL AGUA	POR PERSONA AL DÍA
Beber y cocinar	4 a 6 litros
Higiene básica	2 a 4 litros
Productividad (ganadería, riego, lavandería, otros usos)	0 a 6 litros
USO TOTAL DIARIO DE AGUA:	6 a 16 litros

Paso 1: Determinar la población total pretendida que atenderá el sistema.

Antes de usar la ecuación provista en 2.2.1.1. **Tipos de población: hogares**, debemos preguntarnos si el sistema pretende atender a los 350 hogares. ¿Tendrán estos hogares realmente acceso al agua proporcionada? Para este ejemplo, se determina que se pretende que los 350 hogares utilicen el agua de este proyecto. Por tanto, aplicando la ecuación:

$$\text{Población aproximada} = \text{Número de hogares} \times \text{Número promedio de personas por hogar}$$

$$2,100 \text{ personas} = 350 \text{ hogares} \times 6 \text{ personas por hogar}$$

Paso 2: Agregar a otras personas que usarán el agua.

Esta comunidad tiene una escuela de 700 estudiantes. Si todos o algunos de estos estudiantes no se contabilizaron en el cálculo anterior, entonces se podría agregar estos estudiantes a la cifra de la población o la cantidad total de agua utilizada para esta institución podría agregarse más tarde a la demanda. Sin embargo, en este ejemplo asumiremos que los 700 estudiantes residen en la comunidad. Por lo tanto, ya están contabilizados en la ecuación anterior.

Paso 3: Determinar cuánta agua recolectará cada persona del sistema cada día.

La tabla anterior dio un rango de 6 a 16 litros por persona al día según los diversos usos y las diversas cantidades para cada uso. Sin embargo, es importante que el sistema de agua mediante energía solar esté diseñado para suministrar solo la cantidad de agua que se pretende recolectar del sistema. En esta comunidad, las personas recolectarán del sistema toda el agua utilizada para beber y cocinar. Solo recolectarán del sistema parte del agua que usan para la higiene y no recolectarán del sistema nada de agua de su productividad. Con esta información, se determina que la persona promedio en la comunidad recolectará de seis a ocho litros del sistema al día (para obtener información adicional, ver **2.2.3. Área de uso de agua de servicio**)

Paso 4: Calcular la demanda de agua individual.

En **2.2.4. Predicción de la demanda**, se presenta el cálculo para tres tipos diferentes de demandas individuales. Usando la información anterior de esta comunidad, ahora calcularemos los tres.

El cálculo de la demanda máxima de la puesta en servicio del sistema se realiza utilizando la información ya proporcionada.

$$\text{Demanda máxima en la puesta en servicio del sistema} = \text{Población total de servicio} \times \text{Cantidad total de uso individual}$$

$$16,800 \text{ litros por día} = 2,100 \text{ personas} \times 8 \text{ litros por persona al día}$$

Para realizar el cálculo de la demanda prevista al momento de la puesta en servicio del sistema, es necesario determinar el porcentaje de la población que recolectará agua del sistema. Es raro que el 100% de la población recolecte agua del sistema. Para esta comunidad, determinamos que el 85% de la población utilizará el sistema luego de la puesta en servicio. Asimismo, para llevar a cabo este cálculo, si hay una razón para creer que las personas recolectarán menos de la cantidad individual de agua por día, entonces se debe usar una cifra menor. Como se mencionó anteriormente para el caso de esta comunidad, se cree que las personas recolectarán entre seis y ocho litros al día. Promediaremos esto a siete litros al día para el cálculo.

$$\text{Demanda prevista en la puesta en servicio del sistema} = \text{Población total del servicio} \times \% \text{ previsto de la población que utilizará el sistema} \times \text{Uso individual previsto en la puesta en servicio}$$

$$12,495 \text{ litros por día} = 2,100 \text{ personas} \times 85\% \times 7 \text{ litros por persona al día}$$

Para calcular la demanda futura prevista, primero se debe determinar la población futura. Mediante el uso de los datos del gobierno para esta región de Kenia, se determina que la región crece a una tasa del 2% anual y lo que deseamos analizar es el periodo dentro de 20 años. Usando la ecuación proporcionada en **2.2.4.3.**

Demanda futura prevista para calcular las poblaciones futuras:

$$2,100 \text{ personas} \times \left(1 + \frac{2(\%)}{100}\right)^{20} = 3,120 \text{ personas}$$

Luego, de manera similar al cálculo de la demanda prevista para la puesta en servicio del sistema, se necesita una determinación del porcentaje de la población que recolectará agua del sistema, así como el uso individual previsto. Estas dos cifras pueden ser diferentes de las utilizadas en el cálculo de la demanda prevista para la puesta en servicio del sistema, si es que hay motivos para creer que serán diferentes. Para este ejemplo, todavía usaremos el 85% y siete litros por persona al día.

Demanda futura prevista = Población futura × % previsto de población que utilizará el sistema × Cantidad de uso individual prevista

$$18,564 \text{ litros por día} = 3,120 \text{ personas} \times 85\% \times 7 \text{ litros por persona al día}$$

La sección **2.2.6. Demanda del diseño** recomienda que el sistema se diseñe utilizando la Demanda Prevista de la Puesta en Marcha del Sistema (a menos que todas las partes involucradas estén de acuerdo en que otra demanda sería más aplicable a los objetivos del proyecto). En este ejemplo, esa demanda es de 12,495 litros al día.

Paso 5: Considerar otros usos diarios del agua y las pérdidas de agua del sistema al día.

En el Paso 2 determinamos que la población escolar ya se contabilizó en el cálculo de población del Paso 1. La sección **2.2.5. Pérdidas de agua** del sistema establece que una pérdida diaria del cinco al diez por ciento se considera aceptable. Dado que este sistema utilizará todos los componentes nuevos y lo instalarán contratistas calificados, utilizaremos el 5%.

$$12,495 \text{ litros por día} + 5\% \text{ debido a pérdidas de agua diarias} = 13,120 \text{ litros al día}$$

La sección **2.2. Demanda diaria de agua del proyecto** establece que los componentes básicos del cálculo de la demanda de agua incluyen:

- calcular la población total y el consumo diario de agua de los individuos,
- determinar cualquier otro uso del agua que proporcionará el sistema de agua propuesto y
- evaluar las pérdidas de agua del sistema existentes.

La sección **2.2. Demanda diaria de agua del proyecto** también da la siguiente ecuación general:

$$\text{Demanda diaria de agua del proyecto} = \text{Uso diario individual de agua} \times \text{Población del área de servicio} + \text{Otros usos diarios del agua (instituciones, ganadería, comercial, industrial, recreativa, etc.)} + \text{Pérdidas de agua del sistema al día}$$

En el ejemplo anterior, analizamos cada uno de estos componentes para determinar que la Demanda Diaria de Agua del Proyecto será igual a 13,120 litros al día.

Anexo C.

Ejemplo: Realizar una prueba de rendimiento máximo

(referencia IEC 62253 - 6.2 Datos del cliente, c. condiciones locales específicas)

Se ha determinado que un nuevo pozo es la mejor fuente de agua para servir a una comunidad rural en Kenia. Otros pozos en la región varían de 30 a 70 m de profundidad y tienen rendimientos de 2 a 7 m³/h. Mientras se hacían las preparaciones para la prueba de rendimiento máximo, se midió el nuevo pozo y se obtuvo que posee una profundidad total de 60 m y un nivel de agua estático de 44 m. La bomba se ha configurado para que el sensor de funcionamiento en seco esté a 55 metros bajo tierra.

Paso 1: Determinar el nivel mínimo.

Ver 2.3.1.1.2.1. Descripción

El nivel mínimo debe establecerse unos metros por encima del sensor de funcionamiento en seco de la bomba, el cual está a 55 m en este ejemplo. Por lo tanto, el nivel del agua durante la prueba de rendimiento no debe bajar de 52 m (3 m por encima del funcionamiento en seco). Esto equivale a 8 m de disminución considerando que el nivel de agua estático es de 44 m. Cuando el nivel del agua alcanza el nivel mínimo determinado y permanece constante, el caudal no aumenta, sino que se mantiene durante el resto del tiempo de la prueba.

Paso 2: Determinar los caudales objetivo.

Ver 2.3.1.1.2.2. Procedimiento de la prueba Paso A (b y c).

Basándonos en otros pozos en el área, se estima que el caudal mínimo es de 4 m³/h y el caudal máximo de 7 m³/h. De acuerdo con el procedimiento de prueba, dividimos la diferencia (3 m³/h) en cuatro a seis intervalos para usarlos durante la prueba de rendimiento máximo. Usando seis cantidades iguales, el intervalo será de 0.5 m³/h. Determinamos los caudales objetivo de la prueba de la siguiente manera:

Caudal objetivo 1 = 4.0 m³/h

Caudal objetivo 2 = 4.0 m³/h + 0.5 m³/h = 4.5 m³/h

Caudal objetivo 3 = 4.5 m³/h + 0.5 m³/h = 5.0 m³/h

Caudal objetivo 4 = 5.0 m³/h + 0.5 m³/h = 5.5 m³/h

Caudal objetivo 5 = 5.5 m³/h + 0.5 m³/h = 6.0 m³/h

Repetimos, si en algún momento durante la prueba el nivel del agua cae a 52 m constantes por debajo de la superficie, entonces el caudal no aumentará. Sin embargo, si el nivel del agua no ha alcanzado los 52 m en el caudal objetivo 5, el caudal seguirá aumentando en la misma cantidad de intervalo (0.5 m³/h) cada hora hasta que se alcance el nivel mínimo determinado.

Paso 3: Bombear al caudal objetivo 1 durante una hora.

Ver 2.3.1.1.2.2. **Procedimiento de la prueba** Pasos H-I y filas 1-24 del descenso de nivel para las pruebas de rendimiento de ejemplo.

Para comenzar la prueba, encenderemos la bomba y ajustaremos la válvula de compuerta al caudal objetivo 1, el cual se determinó anteriormente que se encontraba en 4 m³/h. Medimos y registramos el nivel del agua cada minuto durante los primeros quince minutos, y luego cada 5 minutos durante el resto de la primera hora. Registramos los resultados que se muestran a continuación, los cuales indican que el nivel del agua se estabilizó a un descenso de nivel de 4.5 m.

	TIEMPO DESDE QUE INICIÓ EL BOMBEO (MINUTOS)	NIVEL DE AGUA MEDIDO (m)	DESCENSO DE NIVEL RESIDUAL (m)	DESCENSO DE NIVEL ACUMULATIVO (m)	TASA DE BOMBEO MEDIDA (m ³ /h)
1	0	44	0	0	0
2	1	45.5	1.5	1.5	4
3	2	46	0.5	2	4
4	3	46.5	0.5	2.5	4
5	4	46.8	0.3	2.8	4
6	5	47	0.2	3	4
7	6	47.1	0.1	3.1	4
8	7	47.3	0.2	3.3	4
9	8	47.5	0.2	3.5	4
10	9	47.7	0.2	3.7	4
11	10	47.9	0.2	3.9	4
12	11	48.1	0.2	4.1	4
13	12	48.2	0.1	4.2	4
14	13	48.2	0	4.2	4
15	14	48.3	0.1	4.3	4
16	15	48.3	0	4.3	4
17	20	48.3	0	4.3	4
18	25	48.4	0.1	4.4	4
19	30	48.4	0	4.4	4
20	35	48.4	0	4.4	4
21	40	48.5	0.1	4.5	4
22	45	48.5	0	4.5	4
23	50	48.5	0	4.5	4
24	55	48.5	0	4.5	4

Paso 4: Bombear en caudal objetivo 2 durante una hora.

Ver 2.3.1.1.2.2. Procedimiento de la prueba Paso J y filas 25-48 del descenso de nivel para las pruebas de rendimiento de ejemplo.

Debido a que el caudal objetivo 1 no dio como resultado el nivel mínimo determinado, podemos proceder al caudal objetivo 2. A los 60 minutos, abrimos la válvula de compuerta hasta que la tasa de bombeo sea ahora igual al caudal objetivo 2 (4.5 m³/h). Bombearemos otra vez a esta velocidad durante una hora, registrando el nivel del agua cada minuto durante los primeros quince minutos y cada cinco minutos durante el resto de la segunda hora. Luego, registramos los resultados a continuación, los cuales indican que el nivel del agua se estabilizó a un descenso de nivel de 6.1 m.

	TIEMPO DESDE QUE INICIÓ EL BOMBEO (MINUTOS)	NIVEL DE AGUA MEDIDO (m)	DESCENSO DE NIVEL RESIDUAL (m)	DESCENSO DE NIVEL ACUMULATIVO (m)	TASA DE BOMBEO MEDIDA (m ³ /h)	
25	60	48.5	0	4.5	4.5	
26	61	48.8	0.3	4.8	4.5	
27	62	49	0.2	5	4.5	
28	63	49.2	0.2	5.2	4.5	
29	64	49.3	0.1	5.3	4.5	
30	65	49.4	0.1	5.4	4.5	
31	66	49.5	0.1	5.5	4.5	
32	67	49.6	0.1	5.6	4.5	
33	68	49.7	0.1	5.7	4.5	
34	69	49.7	0	5.7	4.5	
35	70	49.8	0.1	5.8	4.5	
36	71	49.8	0	5.8	4.5	
37	72	49.8	0	5.8	4.5	
38	73	49.9	0.1	5.9	4.5	
39	74	49.9	0	5.9	4.5	
40	75	49.9	0	5.9	4.5	
41	80	50	0.1	6	4.5	
42	85	50	0	6	4.5	
43	90	50	0	6	4.5	
44	95	50	0	6	4.5	
45	100	50.1	0.1	6.1	4.5	
46	105	50.1	0	6.1	4.5	
47	110	50.1	0	6.1	4.5	
48	115	50.1	0	6.1	4.5	

Paso 5: Bombear en caudal objetivo 3 durante una hora.

Ver 2.3.1.1.2.2. Procedimiento de la prueba Paso K y filas 49-72 del descenso de nivel para las pruebas de rendimiento de ejemplo.

Debido a que el caudal objetivo 2 no dio como resultado el nivel mínimo determinado, podemos proceder al caudal objetivo 3. A los 120 minutos, abrimos la válvula de compuerta hasta que la tasa de bombeo sea ahora igual al caudal objetivo 3 (5.0 m³/h). Bombearemos otra vez a esta velocidad durante una hora, registrando el nivel del agua cada minuto durante los primeros quince minutos y cada cinco minutos durante el resto de la tercera hora. Luego, registramos los resultados a continuación, los cuales indican que el nivel del agua se estabilizó a un descenso de nivel de 7 m.

	TIEMPO DESDE QUE INICIÓ EL BOMBEO (MINUTOS)	NIVEL DE AGUA MEDIDO (m)	DESCENSO DE NIVEL RESIDUAL (m)	DESCENSO DE NIVEL ACUMULATIVO (m)	TASA DE BOMBEO MEDIDA (m ³ /h)
49	120	50.1	0	6.1	5
50	121	50.3	0.2	6.3	5
51	122	50.4	0.1	6.4	5
52	123	50.5	0.1	6.5	5
53	124	50.5	0	6.5	5
54	125	50.6	0.1	6.6	5
55	126	50.6	0	6.6	5
56	127	50.7	0.1	6.7	5
57	128	50.7	0	6.7	5
58	129	50.7	0	6.7	5
59	130	50.8	0.1	6.8	5
60	131	50.9	0.1	6.9	5
61	132	50.9	0	6.9	5
62	133	50.9	0	6.9	5
63	134	51	0.1	7	5
64	135	51	0	7	5
65	140	51	0	7	5
66	145	51	0	7	5
67	150	51	0	7	5
68	155	51	0	7	5
69	160	51	0	7	5
70	165	51	0	7	5
71	170	51	0	7	5
72	175	51	0	7	5

Paso 6: Bombear en caudal objetivo 4 durante una hora.

Ver 2.3.1.1.2.2. Procedimiento de la prueba Paso K y filas 73-96 del descenso de nivel para las pruebas de rendimiento de ejemplo.

Debido a que el caudal objetivo 3 no dio como resultado el nivel mínimo determinado, podemos proceder al caudal objetivo 4. A los 180 minutos, abrimos la válvula de compuerta hasta que la tasa de bombeo sea ahora igual al caudal objetivo 4 (5.5 m³/h). Bombearemos otra vez a esta velocidad durante una hora, registrando el nivel del agua cada minuto durante los primeros quince minutos y cada cinco minutos durante el resto de la cuarta hora. Registramos los resultados a continuación, los cuales indican que el nivel del agua se estabilizó a un descenso de nivel de 7.8 m.

	TIEMPO DESDE QUE INICIÓ EL BOMBEO (MINUTOS)	NIVEL DE AGUA MEDIDO (m)	DESCENSO DE NIVEL RESIDUAL (m)	DESCENSO DE NIVEL ACUMULATIVO (m)	TASA DE BOMBEO MEDIDA (m ³ /h)
73	180	51	0	7	5.5
74	181	51.2	0.2	7.2	5.5
75	182	51.3	0.1	7.3	5.5
76	183	51.4	0.1	7.4	5.5
77	184	51.5	0.1	7.5	5.5
78	185	51.5	0	7.5	5.5
79	186	51.5	0	7.5	5.5
80	187	51.6	0.1	7.6	5.5
81	188	51.6	0	7.6	5.5
82	189	51.6	0	7.6	5.5
83	190	51.6	0	7.6	5.5
84	191	51.7	0.1	7.7	5.5
85	192	51.7	0	7.7	5.5
86	193	51.8	0.1	7.8	5.5
87	194	51.8	0	7.8	5.5
88	195	51.8	0	7.8	5.5
89	200	51.8	0	7.8	5.5
90	205	51.8	0	7.8	5.5
91	210	51.8	0	7.8	5.5
92	215	51.8	0	7.8	5.5
93	220	51.8	0	7.8	5.5
94	225	51.8	0	7.8	5.5
95	230	51.8	0	7.8	5.5
96	235	51.8	0	7.8	5.5

Paso 7: Bombear en caudal objetivo 5 durante una hora.

Ver 2.3.1.1.2.2. Procedimiento de la prueba Paso K y filas 97-120 del descenso de nivel para las pruebas de rendimiento de ejemplo.

Debido a que el caudal objetivo 4 no dio como resultado el nivel mínimo determinado, podemos proceder al caudal objetivo 5. A los 240 minutos, abrimos la válvula de compuerta hasta que la tasa de bombeo sea ahora igual al caudal objetivo 5 (6.0 m³/h). Bombearemos otra vez a esta velocidad durante una hora, registrando el nivel del agua cada minuto durante los primeros quince minutos y cada cinco minutos durante el resto de la quinta hora. Luego, registramos los resultados a continuación, los cuales indican que el nivel del agua se estabilizó a un descenso de nivel de 8 m. Este es el nivel mínimo determinado.

	TIEMPO DESDE QUE INICIÓ EL BOMBEO (MINUTOS)	NIVEL DE AGUA MEDIDO (m)	DESCENSO DE NIVEL RESIDUAL (m)	DESCENSO DE NIVEL ACUMULATIVO (m)	TASA DE BOMBEO MEDIDA (m ³ /h)
97	240	51.8	0	7.8	6
98	241	51.9	0.1	7.9	6
99	242	51.9	0	7.9	6
100	243	51.9	0	7.9	6
101	244	52	0.1	8	6
102	245	52	0	8	6
103	246	52	0	8	6
104	247	52	0	8	6
105	248	52	0	8	6
106	249	52	0	8	6
107	250	52	0	8	6
108	251	52	0	8	6
109	252	52	0	8	6
110	253	52	0	8	6
111	254	52	0	8	6
112	255	52	0	8	6
113	260	52	0	8	6
114	265	52	0	8	6
115	270	52	0	8	6
116	275	52	0	8	6
117	280	52	0	8	6
118	285	52	0	8	6
119	290	52	0	8	6
120	295	52	0	8	6

Paso 8: Mantener en el descenso de nivel máximo permitido durante el resto de la prueba de 24 horas.

Ver **2.3.1.1.2.2. Procedimiento de la prueba** Pasos L-M y filas 121-140 del descenso de nivel para las pruebas de rendimiento de ejemplo.

Dado que el caudal objetivo 5 dio como resultado que el nivel del agua se estabilizara en el nivel mínimo determinado, no cambiaremos la tasa de bombeo. En cambio, continuaremos bombeando a 6 m³/h y mantendremos el nivel del agua en el nivel mínimo determinado para asegurar que el pozo pueda mantener este rendimiento. Medimos y registramos el nivel del agua cada hora durante el resto de la prueba de 24 horas.

	TIEMPO DESDE QUE INICIÓ EL BOMBEO (MINUTOS)	NIVEL DE AGUA MEDIDO (m)	DESCENSO DE NIVEL RESIDUAL (m)	DESCENSO DE NIVEL ACUMULATIVO (m)	TASA DE BOMBEO MEDIDA (m ³ /h)
121	300	52	0	8	6
122	360	52	0	8	6
123	420	52	0	8	6
124	480	52	0	8	6
125	540	52	0	8	6
126	600	52	0	8	6
127	660	52	0	8	6
128	720	52	0	8	6
129	780	52	0	8	6
130	840	52	0	8	6
131	900	52	0	8	6
132	960	52	0	8	6
133	1020	52	0	8	6
134	1080	52	0	8	6
135	1140	52	0	8	6
136	1200	52	0	8	6
137	1260	52	0	8	6
138	1320	52	0	8	6
139	1380	52	0	8	6
140	1440	52	0	8	6
121	300	52	0	8	6
122	360	52	0	8	6
123	420	52	0	8	6
124	480	52	0	8	6
125	540	52	0	8	6
126	600	52	0	8	6
127	660	52	0	8	6
128	720	52	0	8	6
129	780	52	0	8	6
130	840	52	0	8	6

Paso 8: (Continuación)....

	TIEMPO DESDE QUE INICIÓ EL BOMBEO (MINUTOS)	NIVEL DE AGUA MEDIDO (m)	DESCENSO DE NIVEL RESIDUAL (m)	DESCENSO DE NIVEL ACUMULATIVO (m)	TASA DE BOMBEO MEDIDA (m³/h)
131	900	52	0	8	6
132	960	52	0	8	6
133	1020	52	0	8	6
134	1080	52	0	8	6
135	1140	52	0	8	6
136	1200	52	0	8	6
137	1260	52	0	8	6
138	1320	52	0	8	6
139	1380	52	0	8	6
140	1440	52	0	8	6

Paso 9: Monitorear la recuperación del pozo.

Ver **2.3.1.1.2.2. Procedimiento de la prueba** Pasos N-P y filas 1-8 de recuperación para las pruebas de rendimiento de ejemplo.

Al final de las 24 horas, apagaremos la bomba y monitorearemos la recuperación del pozo. Medimos y registramos el nivel del agua en el pozo cada minuto durante los primeros quince minutos. Luego cada cinco minutos hasta que hayan pasado 60 minutos. Luego, cada diez minutos hasta que el agua vuelva al nivel de agua estático. Registramos los resultados a continuación, los cuales indican que este pozo demora 30 minutos en recuperarse.

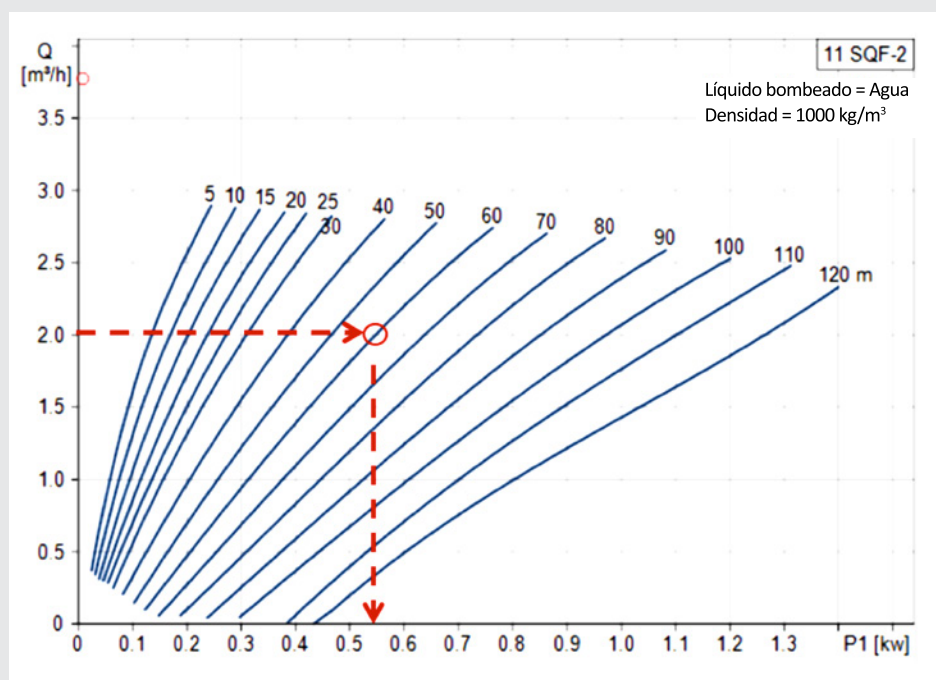
	TIEMPO DESDE QUE SE DETUVO EL BOMBEO (MINUTOS)	NIVEL DE AGUA MEDIDO (m)	DESCENSO DE NIVEL RESIDUAL (m)	DESCENSO DE NIVEL ACUMULATIVO (m)	TASA DE BOMBEO MEDIDA (m ³ /h)
1	0	52	0	8	0
2	1	51.7	-0.3	7.7	0
3	2	51.4	-0.3	7.4	0
4	3	51.0	-0.4	7.0	0
5	4	50.8	-0.2	6.8	0
6	5	50.6	-0.2	6.6	0
7	6	50.2	-0.4	6.2	0
8	7	49.9	-0.3	5.9	0
9	8	49.7	-0.2	5.7	0
10	9	49.3	-0.4	5.3	0
11	10	49.1	-0.2	5.1	0
12	11	48.9	-0.2	4.9	0
13	12	48.7	-0.2	4.7	0
14	13	48.4	-0.3	4.4	0
15	14	48.2	-0.2	4.2	0
16	15	47.9	-0.3	3.9	0
17	20	46.2	-1.7	2.2	0
18	25	45	-1.2	1	0
19	30	44	-1	0	0
20	35	44	0	0	0

Anexo D.

Nota: El caudal seleccionado a continuación responde a la Demanda Diaria de Agua del Proyecto calculada en el Anexo B (13,120 litros al día). Al verificar los datos de irradiancia de la ubicación, se observa que el sitio del proyecto recibe un promedio de nueve horas de luz solar por día y las siete horas centrales del día producen las condiciones de irradiancia más altas (es decir, siete horas pico de luz solar). Se decide que este proyecto se enfocará en la producción de agua durante estas siete horas centrales del día como mínimo (este objetivo de diseño se verificará como parte del proceso de diseño en el Anexo E). El uso de esta información nos da una estimación aproximada del caudal que se requerirá por parte de la bomba ($13,120 \text{ litros} \div 7 \text{ horas} = 1,874 \text{ litros/h}$, o aproximadamente $2 \text{ m}^3/\text{h}$). Asimismo, se observa que el caudal y la carga requerida en el ejemplo siguiente se ven respaldados por los resultados de la prueba de rendimiento del Anexo C.

Ejemplo: Selección de una bomba solar

Selección de una bomba solar sumergible para un sistema con un caudal de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ y una CDT de 60 m.



Curva de desempeño de la bomba solar para Grundfos 11 SQF-2

Paso 1: Encontrar una bomba que pueda lograr la CDT diseñada del sistema.

Utilizar las curvas de desempeño para determinar el rango de CDT que puede alcanzar cada modelo de bomba. Según la curva, el Grundfos 11 SQF-2 tiene un rango de CDT de 5-120 m, lo cual incluye el diseño del sistema de 60 m.

Paso 2: Asegurar que la bomba en cuestión pueda alcanzar el caudal diseñado del sistema.

El eje y del gráfico de la curva de desempeño muestra los caudales que puede producir. Al observar el gráfico, el 11 SQF-2 puede bombear aproximadamente $0\text{-}3 \text{ m}^3/\text{h}$, lo cual abarca el diseño del sistema de $2 \text{ m}^3/\text{h}$. De manera más específica, la marca de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ se cruza con la curva de desempeño de 60 m. Esto indica que Grundfos 11 SQF-2 puede cumplir con el diseño del sistema.

Paso 3: Determinar el requerimiento de potencia.

Encontrar el punto en el gráfico donde la marca de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ se cruza con la curva CDT de 60 m. Luego, bajar directamente hacia el eje x para determinar el requerimiento de potencia. Según el gráfico, Grundfos 11 SQF-2 requiere aproximadamente 550 W para lograr el diseño del sistema.

Anexo E.

Ejemplo: Diseño del sistema FV para una bomba solar

(referencia IEC 62253 – 6.3 Características del sistema, 6.6 Verificación del diseño del sistema de bombeo FV con respecto al volumen de agua diario)

En un ejemplo anterior, determinamos que la demanda diaria de agua del proyecto para una comunidad en la zona rural de Kenia era de 13,120 litros al día. En otro ejemplo, seleccionamos una bomba que podría suministrar un caudal deseado de alrededor de 2 m³/h a una CDT de 60 metros (se seleccionó una Grundfos 11 SQF-2). Después de consultar las curvas de bomba para esta bomba, se determinó que el motor de la bomba requerirá aproximadamente 550 W de potencia para lograr el desempeño deseado. En una revisión adicional de las especificaciones del fabricante, se notó que el motor tiene un rango de voltaje de entrada de 30 a 300 VCC y un consumo máximo de corriente de 8.4. A.

Paso 1: Determinar las condiciones de temperatura ambiente y de irradiación solar para el sitio del proyecto (ver la Sección 2.5.2.).

Como se mencionó en 2.5.3. **Datos mensuales** de temperatura e irradiancia la temperatura ambiente y la irradiancia solar fluctúan a lo largo del año. Con el fin de garantizar que el sistema de agua cubra la demanda de agua durante todos los meses del año, el sistema FV se diseñará utilizando los datos del mes con los valores de irradiancia más bajos. Después de observar los datos disponibles en línea de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), vemos que, durante el mes de irradiancia más baja, la ubicación del proyecto tiene una temperatura ambiente promedio durante el día de 20.9 °C y un perfil de irradiancia diario como se muestra a continuación:

HORA	IRRADIANCIA (W/m ²)
8	327
9	430
10	503
11	551
12	565
13	551
14	503
15	430
16	327

Paso 2: Calcular el desempeño estimado del panel para la ubicación del proyecto.

Los paneles solares con la mayor disponibilidad para el proyecto tienen el siguiente desempeño en condiciones de prueba estándares (STC):

- Punto de máxima potencia (P_{max}): 290 W
- Voltaje del punto de máxima potencia (V_{mpp}): 31.9 V
- Corriente del punto de máxima potencia (I_{mpp}): 9.2 A
- Voltaje de circuito abierto (V_{oc}): 39.6 V
- Corriente de cortocircuito (I_{sc}): 9.75 A
- Coeficiente de temperatura ($TC V_{oc}$): -0.29%/C
- Temperatura normal de funcionamiento de la célula (NOCT): 46°C

El cálculo del desempeño estimado del panel para la ubicación del proyecto se realiza mediante las ecuaciones en **4.1.1.1. Cálculo del rendimiento estimado de un panel según la ubicación del proyecto** para cada hora del día. A continuación, mostraremos los cálculos detallados de las condiciones de irradiancia a las 12 en punto.

Paso 2a: Calcular la temperatura de la célula.

$$\text{Temp. de célula (}^{\circ}\text{C)} = \text{Temp. ambiente (}^{\circ}\text{C)} + (\text{NOCT} - 20^{\circ}\text{C}) \times \frac{\text{Irradiancia (} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{)}}{800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$39.3^{\circ}\text{C} = 20.9^{\circ}\text{C} + (46^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) \times \frac{565 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

Paso 2b: Calcular el voltaje de circuito abierto a la temperatura de la célula.

$$V_{oc} = \text{STC } V_{oc} + (\text{Temp. de célula} - 25^{\circ}\text{C}) \times \text{STC } V_{oc} \times TC V_{oc}$$

$$38.0 \text{ V} = 39.6 \text{ V} + (39.3^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}) \times 39.6 \text{ V} \times -0.29\%/^{\circ}\text{C}$$

Paso 2c: Calcular la corriente de cortocircuito a la irradiancia incidente determinada.

$$I_{sc} = \text{STC } I_{sc} \times \frac{\text{Irradiancia (} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{)}}{1,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$5.51 \text{ A} = 9.75 \text{ A} \times \frac{565 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{1,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

Paso 2d: Calcular la corriente del punto de potencia máxima a la irradiancia determinada.

$$I_{mpp} = \text{STC } I_{mpp} \times \frac{\text{Irradiancia (} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{)}}{1,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

$$5.2 \text{ A} = 9.2 \text{ A} \times \frac{565 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{1,000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}$$

Paso 2e: Calcular la salida del panel solar en las condiciones determinadas.

$$P_{\max} (W) = V_{oc} \times I_{sc} \times \frac{STC I_{mpp} \times STC V_{mpp}}{STC I_{sc} \times STC V_{oc}}$$

$$159.2 W = 38.0 V \times 5.51 A \times \frac{STC I_{mpp} \times STC V_{mpp}}{STC I_{sc} \times STC V_{oc}}$$

Paso 2f: Calcular el voltaje en el punto de máxima potencia del panel.

$$V_{mpp} = \frac{P_{\max}}{I_{mpp}} \quad 30.6 V = \frac{159.2 W}{5.2 A}$$

Siguiendo los mismos pasos, se pueden calcular las condiciones de cada hora del día. Los resultados de dichos cálculos se presentan en la siguiente tabla:

HORA	IRRADIANCIA (W/m ²)	TEMPERATURA DE LA CÉLULA (°C)	V _{OC} (V)	I _{SC} (A)	I _{MPP} (A)	P _{MAX} (W)	V _{MPP} (V)
8	327	31.5	38.9	3.19	3.0	94.3	31.4
9	430	34.9	38.5	4.19	4.0	122.6	30.7
10	503	37.2	38.2	4.90	4.6	142.3	30.9
11	551	38.8	38.0	5.37	5.1	155.1	30.4
12	565	39.3	38.0	5.51	5.2	159.2	30.6
13	551	38.8	38.0	5.37	5.1	155.1	30.4
14	503	37.2	38.2	4.90	4.6	142.3	30.9
15	430	34.9	38.5	4.19	4.0	122.6	30.7
16	327	31.5	38.9	3.19	3.0	94.3	31.4

Paso 3: Diseñar la configuración del panel solar.

Ahora que sabemos la potencia de salida de un solo panel solar considerado para la ubicación de este proyecto, podemos realizar una estimación preliminar de la cantidad de paneles solares necesarios para la instalación. Como se indicó en un ejemplo anterior, uno de los objetivos del diseño es producir agua durante las siete horas centrales del día como mínimo (esto se verificará al final del ejemplo). Por lo tanto, podemos dividir la cantidad de energía requerida (550W) entre la cantidad más baja de energía por panel durante las siete horas centrales del día (122.6W). Hacer esto de manera aproximada nos indica que la instalación deberá constar de alrededor de cuatro paneles (550 W ÷ 122.6 W ≈ 4).

Como se mencionó en **4.1.2. Configuración de una instalación solar**, el cableado de los paneles solares en serie aumentará el voltaje y el cableado en paralelo aumentará la corriente. Asimismo, los paneles suelen estar cableados en serie para lograr el vataje máximo con el menor número de paneles solares. Por lo tanto, el siguiente paso sería verificar la salida de potencia de la instalación durante cada hora de irradiancia con cuatro paneles conectados en serie (usando las ecuaciones dadas en **4.1.2. Configuración de una instalación solar**). Como se hizo anteriormente, mostraremos los cálculos detallados de las condiciones de irradiancia a las 12 en punto.

$$V_{oc} \text{ de la instalación} = V_{oc} \text{ por panel} \times \text{número de paneles en serie}$$

$$152 \text{ V} = 38.0 \text{ V} \times 4$$

$$V_{mpp} \text{ de la instalación} = V_{mpp} \text{ por panel} \times \text{número de paneles en serie}$$

$$122 \text{ V} = 30.6 \text{ V} \times 4$$

$$V_{mpp} \text{ de la instalación} = V_{mpp} \text{ por panel} \times \text{número cadenas paralelas}$$

$$5.2 \text{ A} = 5.2 \text{ A} \times 1$$

$$P_{max} (W) \text{ de la instalación} = I_{mpp} \text{ de la instalación} \times V_{mpp} \text{ de la instalación}$$

$$634 \text{ W} = 5.2 \text{ A} \times 122 \text{ V}$$

Paso 4: Reducir la potencia de salida de la instalación.

Esta salida de potencia calculada de la instalación debe reducirse para tener en cuenta las pérdidas de energía (como se describe en **4.1.3. Pérdidas de energía**). Usaremos un factor de reducción de 0.90 según lo recomendado para un sistema sin inversor.

$$P_{reducido} (W) \text{ de la instalación} = P_{max} (W) \text{ de la instalación} \times \text{factor de reducción}$$

$$571 \text{ W} = 634 \text{ W} \times 0.90$$

Se pueden calcular las condiciones para cada hora del día utilizando las mismas ecuaciones. Los resultados de dichos cálculos se presentan en la siguiente tabla:

HORA	Voc DE LA INSTALACIÓN (V)	Voc DE LA INSTALACIÓN (V)	Impp DE LA INSTALACIÓN (A)	Pmax DE LA INSTALACIÓN (W)	PREDUCIDO DE LA INSTALACIÓN (W)
8	156	126	3.0	378	340
9	154	123	4.0	492	443
10	153	124	4.6	570	513
11	152	122	5.1	622	560
12	152	122	5.2	634	571
13	152	122	5.1	622	560
14	153	124	4.6	570	513
15	154	123	4.0	492	443
16	156	126	3.0	378	340

Paso 5: Verificar que el voltaje y el amperaje de la instalación satisfacen las especificaciones del motor de la bomba.

El voltaje y el amperaje suministrados se deben comparar con las especificaciones del motor de la bomba. Como se indicó anteriormente, el motor de la bomba tiene un rango de voltaje de entrada de 30 a 300 VCC y un consumo máximo de corriente de 8.4.A. Como se puede ver en la tabla anterior, el Voc de la instalación es mayor a 30 pero menor a 300 V. Además, dado que los paneles solares se conectarán en serie, la corriente de la instalación será equivalente a la corriente de un solo panel, la cual es menor que el consumo máximo de corriente de la bomba.

Paso 6: Confirmar que la instalación diseñada permite que la bomba suministre la demanda de agua diaria del proyecto.

La verificación final del diseño es para ver si la energía que suministra la instalación al motor de la bomba permitirá que la bomba pueda abastecer la demanda de agua diaria del proyecto de 13,120 litros al día. Esto se puede estimar mediante la curva de la bomba que proporciona el fabricante. Como se muestra en **3.2.2.2. Selección de una bomba utilizando las curvas de rendimiento de la bomba solar**, la potencia que requiere el motor de la bomba se obtiene al localizar el punto de la curva de la bomba donde el caudal deseado se encuentra con la línea CDT y luego leer la potencia requerida en este punto. Si se trabaja al revés, se puede aproximar un caudal para la energía que suministra la instalación en cada hora del día. (Para esto, se asume que la CDT permanecerá aproximadamente constante o que se puede recalcular la CDT en cada caudal para obtener una mayor precisión). Al usar las curvas de la bomba para Grundfos 11 SQF-2, se observan las siguientes condiciones:

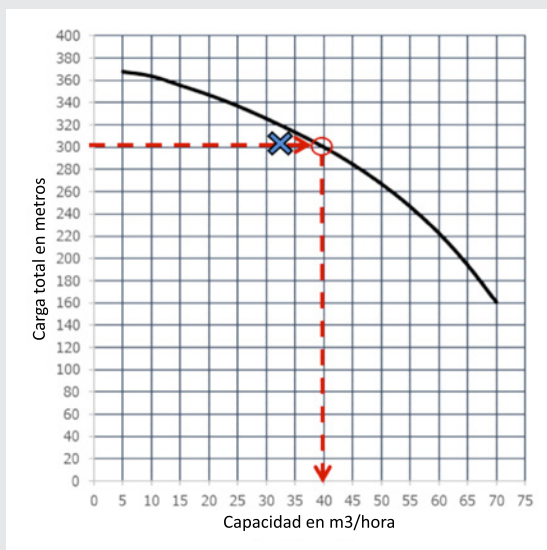
HORA	REDUCIDO DE LA INSTALACIÓN (W)	CAUDAL APROXIMADO A CDT DE 60 M (m ³ /h)	PRODUCCIÓN DE AGUA POR HORA (L)
8	340	1.2	1,200
9	443	1.5	1,500
10	513	1.8	1,800
11	560	2.0	2,000
12	571	2.1	2,100
13	560	2.0	2,000
14	513	1.8	1,800
15	443	1.5	1,500
16	340	1.2	1,200
PRODUCCIÓN TOTAL DE AGUA DIARIA (L):			15,100

Así, un aproximado del total de agua diaria producida es 15,100 litros al día. Si este número fue significativamente mayor o menor que la demanda diaria de agua del proyecto (13,120 litros al día), entonces se debe rediseñar la instalación. IEC 62253 establece que el total suministrado debe estar dentro de una tolerancia de -5% a +20% de la demanda diaria de agua del proyecto. Nuestra producción diaria total aproximada de agua (15,000 litros) es un 15% mayor que la demanda de agua diaria del proyecto (13,120 litros), por lo que nuestro diseño cumple con el requisito. Si el total suministrado estuviera fuera de esta tolerancia, entonces es necesario rediseñarlo usando ya sea un panel solar de diferente tamaño, un número diferente de paneles o una configuración de instalación diferente.

Anexo F.

Ejemplo: Selección de una bomba de CA

Selección de una bomba de CA para un sistema diseñado con un caudal de $33 \text{ m}^3/\text{h}$ y una CDT de 300 m



Curva de rendimiento de la bomba de CA

Paso 1: Encontrar una bomba que pueda lograr la CDT diseñada.

La curva de rendimiento de la bomba indica un rango CDT de aproximadamente 160-370 m. Por lo tanto, la bomba es capaz de funcionar a la CDT diseñada de 300 m.

Paso 2: Encontrar el caudal potencial de la bomba a la CDT diseñada.

Encontrar el punto en la curva de la bomba que corresponde a un valor CDT de 300 m. Luego, encontrar el valor en el eje x (es decir, el caudal potencial) que corresponde a este punto. Según la curva de rendimiento de la bomba de CA, la bomba puede generar $40 \text{ m}^3/\text{h}$ con una CDT de 300 m.

Paso 3: Asegurarse que el caudal potencial excede el caudal diseñado.

El paso 2 determinó que el caudal potencial es de $40 \text{ m}^3/\text{h}$ a un CDT de 300 m, lo cual excede el caudal diseñado de $33 \text{ m}^3/\text{h}$.

Paso 4: Determinar el requerimiento de potencia.

Después de seleccionar la bomba, la cantidad de energía necesaria dependerá de los requerimientos de la bomba y el motor. Esta información debe estar disponible en las especificaciones del fabricante.

Anexo G.

Ejemplo: Diseñar el sistema FV para una bomba de CA con inversor

(referencia IEC 62253 – 6.3 Características del sistema, 6.6 Verificación del diseño del sistema de bombeo FV con respecto al volumen de agua diario)

Este ejemplo usa una ubicación similar, con las mismas condiciones de temperatura e irradiancia, así como la misma selección de panel solar del ejemplo anterior. Se mostrará la diferencia en el diseño de un sistema con una bomba y un inversor alimentados por CA, en comparación con una combinación de bomba y motor que puedan recibir alimentación de CC.

Se ha completado una prueba de rendimiento en un pozo en una gran comunidad en la zona rural de Kenia. Los resultados de la prueba muestran que el rendimiento máximo del pozo es de 39 m³/h con un nivel de agua dinámico de 94.5 metros por debajo del suelo. La comunidad desea acceder al 90% del rendimiento máximo para producir un volumen diario de agua de 295,000 litros al día del pozo. Utilizando un flujo de diseño de 35 m³/h (90% del rendimiento de 39 m³/h), se realizaron cálculos hidráulicos para obtener que la CDT del sistema de agua planificado será de 102.2 metros. Después de ver que todas las combinaciones de bomba y motor disponibles (o conjuntos de bombas FV) que pueden tomar la entrada de energía de CC no podían funcionar a la capacidad deseada, se consideró utilizar una bomba de CA con un inversor. Se seleccionó una bomba y un motor de CA que pueden funcionar a un punto de trabajo de 34.9 m³/h y 102.1 metros de carga a una potencia de motor requerida de 14.3 kW. El motor es un motor trifásico nominal de 50 Hz, 380 V. La documentación del fabricante de la bomba y el motor sugiere que se utilice un inversor de 18.5 kW que cumpla con los requisitos de potencia del motor (50 Hz, 380 V nominal). El inversor tiene un rango de voltaje de entrada de 400 a 800 VCC y una salida de corriente máxima de 38.0 A, así como también está equipado con un variador de frecuencia. Se comprobará la idoneidad del inversor durante el diseño.

Usando los mismos paneles solares de 290 W que en el ejemplo anterior, se obtiene que el rendimiento de un panel individual durante las horas de luz solar en la ubicación del proyecto es el siguiente (para obtener los detalles de cálculo, ver el ejemplo anterior):

HORA	IRRADIANCIA (W/m ²)	TEMPERATURA DE LA CÉLULA (°C)	Voc (V)	Isc (A)	IMPP (A)	PMAX (W)	VMPP (V)
8	327	31.5	38.9	3.19	3.0	94.3	31.4
9	430	34.9	38.5	4.19	4.0	122.6	30.7
10	503	37.2	38.2	4.90	4.6	142.3	30.9
11	551	38.8	38.0	5.37	5.1	155.1	30.4
12	565	39.3	38.0	5.51	5.2	159.2	30.6
13	551	38.8	38.0	5.37	5.1	155.1	30.4
14	503	37.2	38.2	4.90	4.6	142.3	30.9
15	430	34.9	38.5	4.19	4.0	122.6	30.7
16	327	31.5	38.9	3.19	3.0	94.3	31.4

Paso 1: Diseñar la configuración de la instalación solar.

Si es evidente que se utilizarán varias cadenas de paneles solares, se deben tener en cuenta los parámetros de voltaje y corriente del motor o inversor. En el caso del inversor en cuestión, los paneles solares deberán combinarse de tal manera que el voltaje sea mayor a 400 V y menor a 800 V con una corriente no mayor a 38.0 A. Usando estos parámetros, podemos ver que la instalación tendrá entre 11 ($400 \text{ V} \div 38.0 \text{ V} = 11$) y 21 ($800 \text{ V} \div 38.0 \text{ V} = 21$) paneles solares en serie y siete ($38.0 \text{ A} \div 5.51 \text{ A} = 7$) o menos cadenas. Un diseño minucioso verificará diferentes combinaciones para lograr la fuente de alimentación requerida utilizando el menor número de paneles solares. El resto de este ejemplo utilizará siete cadenas de 18 paneles solares para un total de 126 paneles.

Paso 2: Verificar la potencia de salida de la instalación.

Se debe verificar la salida de la instalación durante cada hora de irradiancia (utilizando las ecuaciones dadas en 4.1.2. Configuración de una instalación solar). A continuación, mostramos los cálculos detallados para las condiciones de irradiancia a las 12 en punto.

$$V_{oc} \text{ de la instalación} = V_{oc} \text{ por panel} \times \text{número de paneles en serie}$$

$$152 \text{ V} = 38.0 \text{ V} \times 18$$

$$V_{mpp} \text{ de la instalación} = V_{mpp} \text{ por panel} \times \text{número de paneles en serie}$$

$$550.8 \text{ V} = 30.6 \text{ V} \times 18$$

$$V_{mpp} \text{ de la instalación} = V_{mpp} \text{ por panel} \times \text{número cadenas paralelas}$$

$$36.4 \text{ A} = 5.2 \text{ A} \times 7$$

$$P_{max} (W) \text{ de la instalación} = I_{mpp} \text{ de la instalación} \times V_{mpp} \text{ de la instalación}$$

$$20.0 \text{ kW} = 36.4 \text{ A} \times 550.8 \text{ V}$$

Paso 3: Reducir la potencia de salida de la instalación.

Esta salida de potencia calculada a partir de la instalación debe reducirse para tener en cuenta las pérdidas de energía (como se describe en **4.1.3. Pérdidas de energía**). Usaremos un factor de reducción de 0.85 según lo recomendado para un sistema con un inversor.

$$P_{reducido} (W) \text{ de la instalación} = P_{max} (W) \text{ de la instalación} \times \text{factor de reducción}$$

$$17.0 \text{ kW} = 20.0 \text{ kW} \times 0.85$$

Se pueden calcular las condiciones para cada hora del día utilizando las mismas ecuaciones. Los resultados de dichos cálculos se presentan en la siguiente tabla:

HORA	V _{OC} DE LA INSTALACIÓN (V)	V _{MPP} DE LA INSTALACIÓN (V)	I _{MPP} DE LA INSTALACIÓN (A)	P _{MAX} DE LA INSTALACIÓN (kW)	PREDUCIDO DE LA INSTALACIÓN (kW)
8	700.2	565.2	21.0	11.9	10.1
9	693.0	552.6	28.0	15.5	13.2
10	687.6	556.2	32.2	17.9	15.2
11	684.0	547.2	35.7	19.5	16.6
12	684.0	550.8	36.4	20.0	17.0
13	684.0	547.2	35.7	19.5	16.6
14	687.6	556.2	32.2	17.9	15.2
15	693.0	552.6	28.0	15.5	13.2
16	700.2	565.2	21.0	11.9	10.1

Paso 4: Verificar que el voltaje y el amperaje de la instalación satisfacen al inversor.

Antes de estimar la cantidad de agua que se producirá en estas condiciones de energía, la tabla anterior se puede utilizar para verificar la idoneidad del inversor que sugiere la documentación del fabricante. El inversor sugerido es un inversor de 18.5 kW, 50 Hz con un rango de voltaje de entrada de 400 a 800 VCC y una salida de corriente máxima de 38.0 A. Los resultados del cálculo en la tabla anterior cumplen con las condiciones de voltaje y corriente del inversor y la potencia que se transportará es lo suficientemente cercana a la potencia nominal del inversor.

Paso 5: Confirmar que la instalación diseñada permite que la bomba suministre la demanda de agua diaria del proyecto.

Mediante el uso de las leyes de afinidad y las curvas de rendimiento de la bomba (ver **4.8. Verificación del diseño del sistema con respecto a la demanda diaria de agua del proyecto**), ahora podemos calcular la cantidad prevista de agua producida en cada hora. El primer paso es calcular la frecuencia utilizando la relación de la ley de afinidad entre potencia y velocidad. Tener en cuenta que, como se

Mediante el uso de las leyes de afinidad y las curvas de rendimiento de la bomba (ver **4.8 Verificación del diseño del sistema con respecto a la demanda diaria de agua del proyecto**), ahora podemos calcular la cantidad prevista de agua producida en cada hora. El primer paso es calcular la frecuencia utilizando la relación de la ley de afinidad entre potencia y velocidad. Tener en cuenta que, como se

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$

$$N_2 = \left(\frac{10.1kW}{14.3kW}\right)^{1/3} \times 50Hz = 44.5Hz$$

Sin embargo, como se indicó anteriormente, el motor de la bomba y el inversor son de 50 Hz. Por lo tanto, la frecuencia nunca superará los 50 Hz. La frecuencia calculada para cada uno se presenta en la siguiente tabla:

HORA	PRODUCIDO DE LA INSTALACIÓN (kW)	FRECUENCIA (Hz)
8	10.1	44.5
9	13.2	48.7
10	15.2	50
11	16.6	50
12	17.0	50
13	16.6	50
14	15.2	50
15	13.2	48.7
16	10.1	44.5

A continuación, se determinan las curvas de rendimiento de cada frecuencia calculada. Esto se lleva a cabo calculando varios puntos a lo largo de la curva de desempeño mediante el uso de las leyes de afinidad. Si tomamos cada frecuencia calculada y las relaciones de la ley de afinidad entre el flujo y la velocidad, así como entre la carga y la velocidad, se pueden determinar puntos a lo largo de la curva de rendimiento de la bomba correspondiente para cada frecuencia calculada. A continuación, se muestran los cálculos para un solo punto a lo largo de la curva de rendimiento que corresponde a una frecuencia de 44.5 Hz.

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$Q_2 = \frac{44.5Hz}{50Hz} \times 3.2 m^3/hr = 2.8 m^3/hr$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$$

$$H_2 = \left(\frac{44.5Hz}{50Hz}\right)^2 \times 195.1m = 154.5m$$

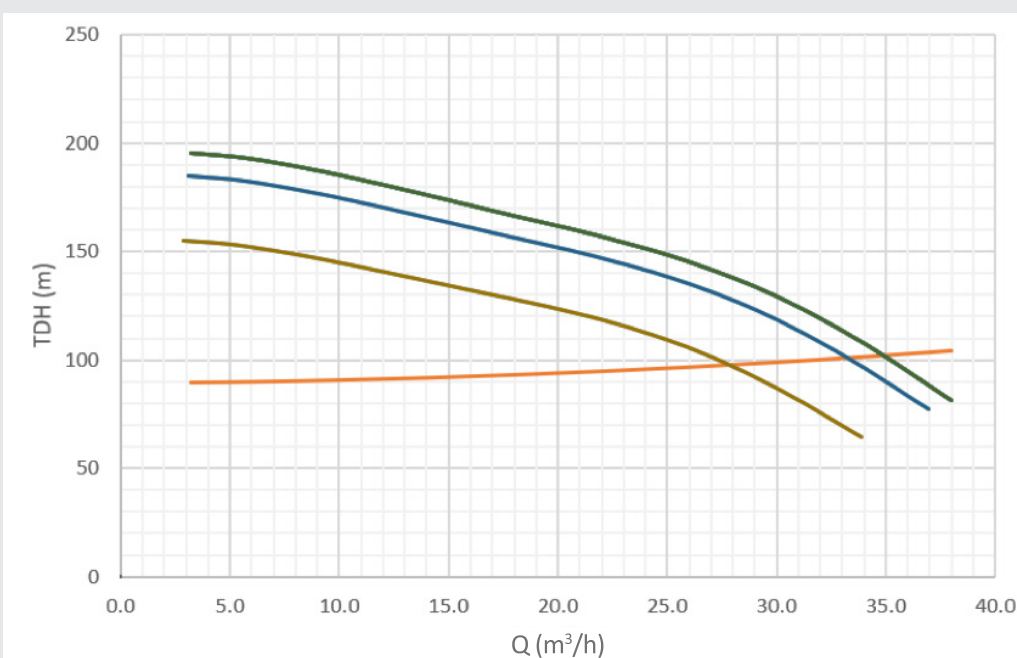
(P = Energía; N = Velocidad; Q = Flujo; H = Carga)

Será necesario calcular varios puntos a lo largo de la curva de rendimiento para cada frecuencia. A continuación, se muestran los resultados del cálculo para diez puntos a lo largo de la curva. Una cantidad mayor o menor de puntos corresponderá a una mayor o menor precisión, respectivamente, en los resultados finales. En la siguiente tabla, hemos calculado diez puntos en la curva de rendimiento correspondiente a 44.5 Hz, iniciando con diez puntos a lo largo de la curva de desempeño de máxima potencia o 50 Hz.

Puntos en la curva de rendimiento para 50 Hz		Puntos en la curva de rendimiento para 44.5 Hz	
Q_1 (m ³ /h)	H_1 (m)	Q_2 (m ³ /h)	H_2 (m)
3.2	195.1	2.8	154.5
6	192.4	5.3	152.4
10	185.0	8.9	146.5
18	166.2	16.0	131.6
22	156.7	19.6	124.1
26	145.1	23.1	114.9
30	129.3	26.7	102.4
34	107.7	30.3	85.3
34.9	102.1	31.1	80.9
38	81.5	33.8	64.6

Estos mismos cálculos también deberán realizarse para la curva de rendimiento de 48.7 Hz.

Es importante reconocer que los puntos (Q_2 , H_2) en la tabla anterior representan puntos a lo largo de una curva de rendimiento para la bomba y no hay puntos a lo largo de la curva del sistema para el sistema de agua propuesto. En el siguiente gráfico, las curvas verde y azul son las curvas de rendimiento de la bomba a 50 Hz, 48.7 Hz y 44.5 Hz.



La curva naranja en el gráfico representa la curva del sistema para el sistema de agua propuesto. La curva del sistema se determina calculando la CDT para múltiples valores de flujo (como se indicó anteriormente, esta guía de diseño no presenta los métodos de cálculo de CDT, ya que los métodos de cálculo de CDT para un sistema de bombeo mediante energía solar no presentan diferencias con respecto a los métodos usados en cualquier otro sistema de bombeo mecanizado).

Las intersecciones de la curva del sistema y cada curva de rendimiento representan el caudal del sistema a la frecuencia correspondiente para cada hora del día. El valor de flujo en cada intersección se puede observar de manera gráfica y se calcula mediante el siguiente método. La siguiente tabla muestra los valores de caudal y carga a lo largo de la curva de rendimiento de 44.5 Hz y la CDT del sistema de agua propuesto para cada caudal.

Q_2 (m ³ /h)	H_2 (m)	CDT (m)
2.8	154.5	89.6
5.3	152.4	89.9
8.9	146.5	90.5
16.0	131.6	92.5
19.6	124.1	93.8
23.1	114.9	95.4
26.7	102.4	97.2
30.3	85.3	99.2
31.1	80.9	100.1
33.8	64.6	101.4

Se puede observar en el gráfico anterior que la curva del sistema se cruza con la curva de rendimiento de 44.5 Hz entre 25 m³/h y 30 m³/h. Asimismo, la tabla anterior muestra que la CDT para 26.7 m³/h está por debajo de la carga de la curva de rendimiento, pero la CDT para 30.3 m³/h está por encima de la carga de la curva de rendimiento. Mediante el uso de un método de interpolación, podemos usar estos caudales y los valores correspondientes de CDT y de carga de la curva de rendimiento para calcular el caudal donde la CDT correspondiente del sistema de agua propuesto y la carga en la curva de rendimiento sean iguales.

$$\frac{(30.3 - 26.7)}{[(99.2 - 85.3) - (97.2 - 102.4)]} = \frac{(Q_{\text{en la intersección}} - 26.7)}{[0 - (97.2 - 102.4)]}$$

$$Q_{\text{intersection}} = 27.7 \text{ m}^3/\text{h}$$

Se debe tener en cuenta que este caudal se puede verificar al calcular la CDT del sistema de agua propuesto para este caudal y verificar la carga en la curva de rendimiento de la bomba para ver que los dos valores sean iguales.

HORA	PREDUCIDO DE LA INSTALACIÓN (kW)	FRECUENCIA (Hz)	FLUJO (m³/h)	PRODUCCIÓN DE AGUA POR HORA (L)
8	10.1	44.5	27.7	27,700
9	13.2	48.7	33.2	33,200
10	15.2	50	34.9	34,900
11	16.6	50	34.9	34,900
12	17.0	50	34.9	34,900
13	16.6	50	34.9	34,900
14	15.2	50	34.9	34,900
15	13.2	48.7	33.2	33,200
16	10.1	44.5	27.7	27,700
PRODUCCIÓN TOTAL DE AGUA DIARIA (L):				296,300

El agua diaria total producida aproximada (296,300 litros) es menor que más del 1% de la demanda diaria de agua del proyecto (295,000 litros), por lo que nuestro diseño cumple con el requisito de IEC 62253 de estar dentro de una tolerancia de -5% a + 20% de la demanda diaria de agua del proyecto.

Anexo H.

Potencia hidráulica, potencia de frenado y potencia del motor

La energía que una bomba puede agregar al agua depende de la potencia que se le suministre al motor de la bomba. Por lo general, la potencia requerida por un motor de bomba se puede identificar mediante la curva de la bomba proporcionada por el fabricante y la información adjunta. Se incluyen las siguientes ecuaciones para la potencia hidráulica, de frenado y del motor para ayudar a comprender los requerimientos y el rendimiento del motor que impulsa la bomba.

Potencia hidráulica (P_h)

La potencia hidráulica es la cantidad de energía que se transfiere de la bomba al agua. En unidades SI, la potencia hidráulica se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$P_h \text{ (kW)} = \frac{Q \times \gamma \times H}{1,000}$$

donde: P_h = potencia hidráulica (kW)

Q = caudal (m^3/s)

" γ " = peso específico del agua ($9,810 \text{ N/m}^3$)

H = carga de la bomba (m)

Potencia de frenado (P2 o BP)

La potencia de frenado es la cantidad de energía que debe transferirse del motor a la bomba para lograr la potencia hidráulica deseada. Debido a ineficiencias en la bomba, la potencia de frenado siempre será mayor que la potencia hidráulica. La principal diferencia entre calcular la potencia de frenado y calcular la potencia hidráulica es que la ecuación para la potencia de frenado tiene en cuenta la eficiencia de la bomba. En unidades SI, la potencia de frenado se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$BP \text{ (kW)} = \frac{P_h \text{ (kW)}}{\eta_p} = \frac{Q \times \gamma \times H}{\eta_p \times 1,000}$$

donde: BP = potencia de frenado (kW)

P_h = potencia hidráulica (kW)

η_p = eficiencia de la bomba (%)

Q = caudal (m^3/s)

" γ " = peso específico del agua ($9,810 \text{ N/m}^3$)

H = carga de la bomba (m)

Potencia del motor (P1 o MP)

La potencia del motor es la energía requerida por el motor de la bomba para suministrar suficiente potencia hidráulica y de frenado. La potencia del motor siempre será mayor que la potencia de frenado (y que la potencia hidráulica) debido a ineficiencias en el motor. Tener en cuenta la eficiencia del motor es la principal diferencia entre calcular la potencia del motor y la potencia de frenado. Es importante tener en cuenta que una curva de bomba es la que proporciona la potencia del motor (aunque algunas curvas de bomba mostrarán la potencia del motor y la potencia de frenado como P_1 y P_2 , respectivamente). Para unidades SI, la potencia del motor se calcula usando la siguiente ecuación:

$$MP \text{ (kW)} = \frac{BP \text{ (kW)}}{\eta_m} = \frac{P_h \text{ (kW)}}{\eta_p \times \eta_m} = \frac{Q \times \gamma \times H}{\eta_p \times \eta_m \times 1,000}$$

donde: MP = potencia del motor (kW)

BP = potencia de frenado (kW)

η_m = eficiencia del motor (%)

P_h = potencia hidráulica (kW)

η_p = eficiencia de la bomba (%)

Q = caudal (m^3/s)

" γ " = peso específico del agua ($9,810 \text{ N/m}^3$)

H = carga de la bomba (m)





División de programa de UNICEF | 3 UN Plaza | Nueva York, NY 10017, EE. UU.

División de Suministro de UNICEF | Oceanvej 10-12 | Copenhague, Dinamarca

[unicef.org](https://www.unicef.org)

Water Mission | 1150 Molly Greene Way, Edificio 1605 | North Charleston, Carolina del Sur 29405

Teléfono: +1.843.769.7395 | **[watermission.org](https://www.watermission.org)**