

Volumen 1
Libro de Consulta

Guía

para el desarrollo
de proyectos de
Bombeo de Agua
con

Energía

Fotovoltaica



El material que se presenta en esta guía proviene de diversas fuentes públicas y privadas. El Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) ha contribuido en gran medida con sus experiencias directas. El personal de Sandia National Laboratories (SNL) y el Southwest Technology Development Institute (SWTDI) participaron en la capacitación y asistencia técnica. El gobierno del Estado de Chihuahua a través de la Dirección General de Desarrollo Rural y la Coordinación de Fortalecimiento Municipal participaron en la identificación de proyectos piloto y seguimiento del rendimiento de los sistemas actualmente en operación. También se obtuvo la ayuda de la Asociación Nacional de Energía Solar de México y el Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México. A estas organizaciones y a su personal, se les extiende un sincero agradecimiento.

Colaboradores:

José M. Arango, FIRCO
Marcela Ascencio, FIRCO
Roger Barrientos, FIRCO
Cristina Briones, SWTDI
Lisa Büttner, SWTDI
Omar Carrillo, SWTDI
Gabriela Cisneros, SWTDI
Alma Cota, SWTDI
Ron Donaghe, SWTDI
Abraham Ellis, SWTDI
Luis Estrada, SWTDI
Alberto Fernández, FIRCO

Robert Foster, SWTDI
Shannon Graham, ENERSOL
Charles Hanley, SNL
Octavio Montufar, FIRCO
Jorge Ríos, SWTDI
Vern Risser, SWTDI
Jaime Rochín, FIRCO
Arturo Romero-Paredes, EyNT
Michael Ross, SNL
Chris Rovero, WINROCK
Aarón Sánchez, CIE-UNAM
John Strachan, SNL

Finalmente, un sincero agradecimiento a todas aquellas personas no mencionadas aquí que con su crítica constructiva ayudaron en la elaboración de este documento.



Esta guía fue redactada en relación al trabajo patrocinado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (USDOE) y la Agencia para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (USAID) manejada por los Laboratorios Sandia (SNL). Ninguna de las instituciones, USDOE, USAID, SNL, Southwest Technology Development Institute (SWTDI), Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO), los empleados o contratistas y subcontratistas ofrecen garantía alguna sobre el uso y aplicaciones de esta publicación. Este documento se ha escrito de buena fe y la información y datos se consideran correctos en la fecha de su publicación. La mención explícita o implícita de marcas comerciales, fabricantes, productos y servicios no constituye apoyo, patrocinio, endoso o recomendación por parte de los autores o instituciones mencionadas; sólo se incluyen para facilitar el entendimiento de los temas cubiertos.

El equipo y servicios comercialmente disponibles para el bombeo solar varía por países y regiones geográficas. Se recomienda comparar estos productos y servicios entre diversos proveedores y buscar asesoría técnica antes de adquirirlos.

Agradeceremos cualquier comentario sobre este manual escribiendo a :

Southwest Technology Development Institute
New Mexico State University
P. O. Box 30001, MSC 3SOL
Las Cruces, NM 88003-8001
Correo electrónico: swtdi@nmsu.edu

Esta impresión ha sido autorizada por el Southwest Technology Development Institute, New Mexico State University.

La corrección e impresión fue realizada por Aaron Sánchez Juárez del Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México y corresponde a la 2ª revisión del documento original.

Las correcciones aquí presentes han sido realizado de buena fe y la información y datos se consideran correctos en la fecha de su publicación.

Temixco, Mor., a 19 de Marzo del 2001.

Tercera revisión del documento completo realizada por:
Arturo Romero Paredes Rubio.
Ecoturismo y Nuevas tecnologías s.a. de c.v.
Marzo 24 de 2001



En 1994, la entidad gubernamental mexicana Fideicomiso de Riesgo Compartido (FIRCO) adoptó el uso y promoción de las tecnologías de energía renovable en aplicaciones agropecuarias. Con estos fines se unió a los esfuerzos de Sandia National Laboratories (SNL)[Sandia], organismo perteneciente al Departamento de Energía de los Estados Unidos (USDOE), en la implementación de tecnologías de energía renovable en aplicaciones productivas.

En su inicio, ambas instituciones acordaron promover el uso de sistemas de bombeo de agua activados con energía solar fotovoltaica ya que representaba una alternativa conveniente para el abrevadero de animales en regiones apartadas de la red eléctrica de México. Tales proyectos de bombeo tuvieron inicio en los Estados de Baja California Sur, Chihuahua, Quintana Roo y Sonora.

En este lapso de tiempo, el personal técnico de FIRCO obtuvo capacitación para la identificación de proyectos factibles, operación de estos sistemas, dimensionamiento y evaluación técnica y económica de propuestas de casas comerciales. Así mismo, el personal técnico de Sandia puso en marcha un programa de capacitación y asesoramiento de proveedores, diseñadores y casas distribuidoras de material de bombeo y solar con el fin asegurar una máxima calidad en las instalaciones y productos instalados.

Los buenos resultados obtenidos en esta fase proporcionaron un incentivo para continuar el programa y extenderlo a otros estados de México. Fue así que FIRCO y Sandia extendieron el programa a Chiapas, Oaxaca, San Luis Potosí, y Veracruz. Allí se desarrollaron proyectos de pequeña escala de electrificación rural, bombeo de agua y comunicaciones. Los proyectos se apoyaron con programas gubernamentales de inversión para el desarrollo del sector agropecuario de México. Durante los cinco siguientes años, se instalaron con éxito más de 200 sistemas de bombeo de distintas capacidades.

Esta guía se ha escrito basándose en las experiencias obtenidas por las personas involucradas en el programa. La intención es que estas valiosas experiencias contribuyan a la expansión del uso de energía renovable en zonas rurales. Los proyectistas, ingenieros de campo y cualquier personal involucrado en desarrollo rural podrá beneficiarse de estas experiencias, por lo que este manual se considera como una aportación a los productores del campo



Capítulos y Secciones	Página
INTRODUCCIÓN	1
<i>BOMBEO DE AGUA CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA</i>	<i>1</i>
FACTIBILIDAD DE LA OPERACIÓN SOLAR	2
<i>OTRAS FUENTES DE ENERGÍA</i>	<i>3</i>
<i>APLICACIONES Y USO DEL AGUA</i>	<i>3</i>
<i>CARACTERÍSTICAS DEL BOMBEO</i>	<i>3</i>
<i>DISPONIBILIDAD DEL RECURSO SOLAR</i>	<i>4</i>
<i>OTRAS CONSIDERACIONES</i>	<i>5</i>
ENERGÍA FOTOVOLTAICA	7
<i>EL RECURSO SOLAR</i>	<i>7</i>
<i>LA TRAYECTORIA SOLAR</i>	<i>9</i>
<i>DATOS DE INSOLACIÓN</i>	<i>10</i>
<i>EFECTO FOTOVOLTAICO</i>	<i>11</i>
<i>MATERIALES DE FABRICACIÓN</i>	<i>12</i>
<i>PRINCIPIOS DE LA CONVERSIÓN FOTOVOLTAICA</i>	<i>13</i>
<i>CONCEPTOS BÁSICOS DE ELECTRICIDAD</i>	<i>14</i>
<i>LA CELDA SOLAR DE SILICIO CRISTALINO</i>	<i>14</i>
<i>MÓDULO FOTOVOLTAICO</i>	<i>16</i>
<i>ARREGLOS FOTOVOLTAICOS</i>	<i>20</i>
<i>INCLINACIÓN DEL ARREGLO FOTOVOLTAICO</i>	<i>23</i>
HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE BOMBEO	27
<i>CARGA ESTÁTICA</i>	<i>27</i>
<i>CARGA DINÁMICA (FRICCIÓN)</i>	<i>28</i>
<i>CARGA DINÁMICA (FRICCIÓN)</i>	<i>28</i>
<i>Valor por omisión</i>	<i>29</i>
<i>Tablas de fricción</i>	<i>29</i>
<i>Fórmula de Manning</i>	<i>29</i>
BOMBEO FOTOVOLTAICO	33
<i>ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA</i>	<i>34</i>
<i>EQUIPO DE BOMBEO COMPATIBLE CON SISTEMAS FOTOVOLTAICOS</i>	<i>34</i>
<i>BOMBAS CENTRÍFUGAS</i>	<i>34</i>
<i>BOMBAS VOLUMÉTRICAS</i>	<i>37</i>
<i>SELECCIÓN DE LA BOMBA</i>	<i>40</i>
<i>TIPOS DE MOTORES</i>	<i>41</i>
<i>CONTROLADORES</i>	<i>41</i>
DIMENSIONAMIENTO	43
<i>INSTRUCCIONES PARA LLENAR LAS HOJAS DE CÁLCULO</i>	<i>44</i>
ASPECTOS ECONÓMICOS	55
<i>ESTIMACIÓN DEL COSTO DEL SISTEMA</i>	<i>55</i>
<i>Tabla de costos aproximados</i>	<i>55</i>
<i>Datos históricos de sistemas instalados en México</i>	<i>56</i>
<i>Comparación de alternativas de bombeo</i>	<i>58</i>

<i>Cálculo del costo del Ciclo de Vida Útil (CCVU)</i>	58
<i>Conceptos básicos</i>	59
<i>Pasos para determinar el CCVU</i>	60
<i>Ejemplos Ilustrativos</i>	62
INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	70
<i>INTRODUCCIÓN</i>	70
<i>INSTALACIÓN DEL SISTEMA</i>	70
<i>Cableado y conexiones eléctricas</i>	71
<i>Puesta a tierra</i>	71
<i>Obra civil y plomería</i>	71
<i>Instalación de bombas superficiales</i>	72
<i>Instalación de bombas sumergibles</i>	73
<i>OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA</i>	74
<i>El arreglo FV</i>	75
<i>Bombas y motores</i>	75
CONSIDERACIONES INSTITUCIONALES DEL DESARROLLO CON ENERGÍA RENOVABLE	77
<i>SUSTENTABILIDAD</i>	77
<i>CONSIDERACIONES INSTITUCIONALES</i>	78
<i>ASPECTOS POLÍTICOS</i>	78
<i>FORMACIÓN DE CAPACIDAD</i>	78
<i>EDUCACIÓN Y CAPACITACIÓN</i>	79
<i>ASISTENCIA TÉCNICA</i>	80
<i>DESARROLLO DE LA INFRAESTRUCTURA LOCAL</i>	80
<i>IMPLEMENTACIÓN DE PROGRAMAS</i>	81
<i>REALICE PLANES ESTRATÉGICOS</i>	82
<i>IMPLEMENTACIÓN DE PROYECTOS PILOTO</i>	82
<i>CREACIÓN DE MERCADOS SUSTENTABLES</i>	84
<i>ADOpte UN MÉTODO DE DESARROLLO ENTRE LA POBLACIÓN</i>	84
<i>INSTALE EL EQUIPO ADECUADO</i>	85
<i>MONITOREO</i>	85
<i>MODELOS INSTITUCIONALES PARA DISEMINACIÓN DE LA ENERGÍA RENOVABLE</i>	86
<i>VENTAS AL CONTADO</i>	87
<i>FINANCIAMIENTO A LOS CONSUMIDORES</i>	88
<i>FONDOS DE CRÉDITO REVOLVENTE</i>	88
<i>CRÉDITO BANCARIO LOCAL</i>	88
<i>ARRENDAMIENTO</i>	89
<i>CRÉDITO DEL DISTRIBUIDOR</i>	89
<i>SUBSIDIOS</i>	89
<i>CONCLUSIONES</i>	90
REFERENCIAS	91
APÉNDICE A: INSOLACIÓN GLOBAL EN MÉXICO	1
APÉNDICE B: FACTORES DE PÉRDIDA POR FRICCIÓN	1
APÉNDICE C: RANGOS DE OPERACIÓN DE BOMBAS FV	1
APÉNDICE D: TABLA DE COSTOS APROXIMADOS DE SISTEMA FV DE BOMBEO Y TABLAS DE FACTORES DE VALOR PRESENTE	1

FIGURA 1. SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA DE BOMBEO DE ACUERDO AL CICLO HIDRÁULICO.	4
FIGURA 2. DIAGRAMA DE FLUJO DE DECISIONES PARA BOMBEO CONSIDERANDO DOS TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA.	6
FIGURA 3. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA BOMBEO DE AGUA.	7
FIGURA 4. IRRADIANCIA Y HORAS SOLARES PICO (INSOLACIÓN) DURANTE UN DÍA SOLEADO.	9
FIGURA 5. MOVIMIENTO APARENTE DEL SOL EN LA BÓVEDA CELESTE EN FUNCIÓN DE LA HORA DEL DÍA Y LA ÉPOCA DEL AÑO (21 DE DICIEMBRE Y 21 DE JUNIO RESPECTIVAMENTE) PARA UNA LATITUD DE 16°N.....	10
FIGURA 6. REPRESENTACIÓN FÍSICA DEL EFECTO FOTOVOLTAICO EN UNA CELDA SOLAR.	12
FIGURA 7. GENERACIÓN ELÉCTRICA EN UNA CELDA FOTOVOLTAICA.	15
FIGURA 8. CURVA I vs V Y P vs V PARA UN MÓDULO FOTOVOLTAICO TÍPICO A 1,000 W/M ² Y 25°C	17
FIGURA 9. DEPENDENCIA DE LA CORRIENTE PRODUCIDA EN FUNCIÓN DEL VOLTAJE PARA DIFERENTES INTENSIDADES DE RADIACIÓN (TEMPERATURA CONSTANTE DE 25°C).....	19
FIGURA 10. DEPENDENCIA DE LA CORRIENTE PRODUCIDA EN FUNCIÓN DEL VOLTAJE PARA DIFERENTES TEMPERATURAS DE OPERACIÓN (IRRADIANCIA CONSTANTE 1,000W/M ²).....	20
FIGURA 11. ANALOGÍA DE UNA CONEXIÓN EN SERIE ENTRE UN SISTEMA ELÉCTRICO Y UN HIDRÁULICO.....	21
FIGURA 12. ANALOGÍA DE UNA CONEXIÓN EN PARALELO ENTRE UN SISTEMA ELÉCTRICO Y UN HIDRÁULICO.....	22
FIGURA 13. LA CONEXIÓN DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	23
FIGURA 14. ORIENTACIÓN DE UNA ESTRUCTURA FIJA PARA MAXIMIZAR LA CAPTACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR A LO LARGO DEL AÑO	24
FIGURA 15. SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA ENERGIZADO CON 16 MÓDULOS SOLARES.	26
FIGURA 16. PRINCIPALES COMPONENTES HIDRÁULICOS DE UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA	28
FIGURA 17. ESQUEMA DE UNA INSTALACIÓN TÍPICA DE UN SISTEMA FV DE BOMBEO DE AGUA	33
FIGURA 18. BOMBA CENTRÍFUGA SUPERFICIAL (SOLARRAM)	35
FIGURA 19. ESQUEMA DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA SUPERFICIAL	35
FIGURA 20. ESQUEMA DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA SUMERGIBLE	36
FIGURA 21. VISTA INTERNA DE UNA BOMBA SUMERGIBLE (GRUNDFOS).....	36
FIGURA 22. BOMBAS CENTRÍFUGAS SUMERGIBLES (SOLARJACK)	37
FIGURA 23. ESQUEMA DE UNA BOMBA VOLUMÉTRICA DE CILINDRO	38
FIGURA 24. ESQUEMA DE UNA BOMBA DE DIAFRAGMA SUMERGIBLE.....	39
FIGURA 25. BOMBAS DE DIAFRAGMA SUPERFICIALES(SHURFLO)	39
FIGURA 26. INTERVALOS COMUNES DONDE SE APLICA LOS DIFERENTES TIPOS DE BOMBAS SOLARES	40
FIGURA 27. CONTROLADOR TÍPICO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BOMBEO (SAN LORENCITO, CHIHUAHUA)	42
FIGURA 28. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE UN POZO	43
FIGURA 29. CURVA DE RENDIMIENTO (EJEMPLO PARA GRUNDFOS SP 3A-10).....	51
FIGURA 30. COSTOS DE SISTEMAS INSTALADOS EN FUNCIÓN DEL CICLO HIDRÁULICO DIARIO	56
FIGURA 31. COSTO POR WATT EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DEL SISTEMA	57
FIGURA 32. VILLA DE LEYVA, QUINTANA ROO – COMPARACIÓN DE COSTOS EN VALORES PRESENTE.....	65
FIGURA 33. VILLA DE LEYVA, QUINTANA ROO – PERIODO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN	65
FIGURA 34. EL JEROMÍN, CHIHUAHUA – COMPARACIÓN DE COSTOS EN VALORES PRESENTE	67
FIGURA 35. EL JEROMÍN, CHIHUAHUA – PERIODO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN	67
FIGURA 36. AGUA BLANCA, BAJA CALIFORNIA SUR, COMPARACIÓN DE COSTOS EN VALORES PRESENTE	69
FIGURA 37. AGUA BLANCA, BAJA CALIFORNIA SUR –PERIODO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN	69
FIGURE 38. INSTALACIÓN DE UNA BOMBA SUPERFICIAL (TIPO "PUMPING JACK"), EN EL RANCHO GUADALUPE EN CHIHUAHUA, MÉXICO. LA CARGA DINÁMICA TOTAL ES DE 170 M	72
FIGURE 39. INSTALACIÓN DE UNA BOMBA FV SUMERGIBLE EN ESTACIÓN TORRES, SONORA, MÉXICO	74
FIGURA 40. CURSO DE CAPACITACIÓN DE SANDIA EN ENERGÍA SOLAR EN VERACRUZ, MÉXICO.....	80
FIGURA 41. MULAS EMPLEADAS PARA TRANSPORTAR MÓDULOS FOTOVOLTAICOS A UN ÁREA REMOTA DE CHIHUAHUA, MÉXICO.....	81
FIGURA 42. INSTALACIÓN DE UN SISTEMA PILOTO DE BOMBEO FV DE AGUA EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA, MÉXICO	83

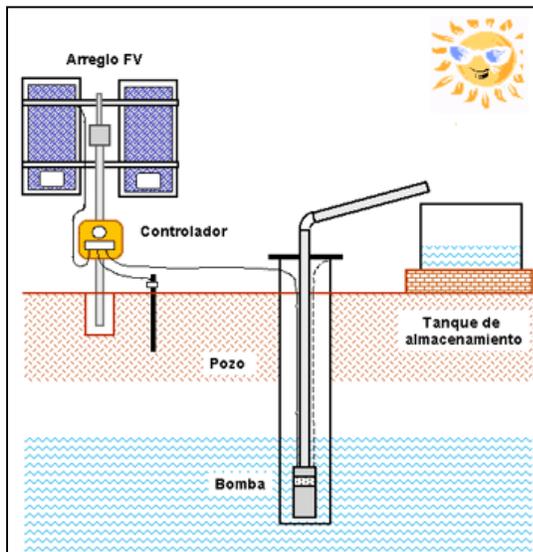
FIGURA 43. TENDENCIA A LA BAJA DEL COSTO PROMEDIO POR WATT INSTALADO EN 41 SISTEMAS DE BOMBEO DE AGUA FV PILOTO EN MÉXICO IMPLEMENTADO POR EL GRUPO DE TRABAJO DE ENERGÍA RENOVABLE EN CHIHUAHUA JUNTO CON SNL Y NMSU	84
FIGURA 44. PIRÁMIDE DE MÉTODOS DE VENTAS DE ENERGÍA RENOVABLE A NIVEL INSTITUCIONAL	87
TABLA 1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL BOMBEO SOLAR	2
TABLA 2. PLACA DEL FABRICANTE DE UN MÓDULO SOLAREX VLX-53	18
TABLA 3. VALORES DE LA CONSTANTE K USADO EN LA FÓRMULA DE MANNING	29
TABLA 4. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS FOTOVOLTAICAS	41
TABLA 5. CÁLCULO DEL MES CRÍTICO	44
TABLA 6. VALORES POR OMISIÓN DE EFICIENCIAS DE SISTEMAS DE BOMBEO	46
TABLA 7. CUADRO DE SELECCIÓN DE BOMBA DE UN FABRICANTE*	53
TABLA 8. COSTO APROXIMADO DE SISTEMAS DE COMBUSTIÓN INTERNA	61
TABLA 9. AÑOS DE VIDA ÚTILES DE EQUIPO DE SISTEMAS FV Y SISTEMAS DE COMBUSTIÓN INTERNA	61
TABLA 10. SUPOSICIONES DEL ANÁLISIS CCV	63
TABLA A-1. INSOLACIÓN GLOBAL MEDIA INCLINACIÓN A A LATITUD EN MÉXICO EN KWH/M ² -DÍA	2
TABLA B-1. FACTORES DE PÉRDIDA POR FRICCIÓN EN PVC RÍGIDO	2
TABLA B-2. FACTORES DE PÉRDIDA POR FRICCIÓN EN ACERO GALVANIZADO	3
TABLA C-1. RANGOS DE OPERACIÓN DE ALGUNAS BOMBAS FV	2
TABLA D-1. COSTOS APROXIMADOS PARA SISTEMAS DE BOMBEO FOTOVOLTAICO EN MÉXICO	2
TABLA D-2. FVP FACTOR DE VALOR PRESENTE DE UN PAGO CON INTERÉS	3
TABLA D-3. FVPA FACTOR DE VALOR PRESENTE DE PAGOS ANUALES FIJOS	4



La energía es de vital importancia para el desarrollo económico de cualquier país. Con ella es posible llevar a cabo los trabajos que el hombre por sí solo es incapaz de hacer. Existen diversas fuentes de energía, entre ellas están los combustibles fósiles y las fuentes de energía renovable como el sol y el viento entre otras. La energía solar y eólica se denominan renovables debido a que son un recurso inagotable respecto del ciclo de vida humano. Además, presentan la característica de ser abundantes y limpias. Con tecnologías maduras, las fuentes renovables de energía tienen un gran potencial para la generación de energía. Así por ejemplo, la tecnología fotovoltaica que transforma directamente la luz solar en electricidad, ha mostrado ser de gran utilidad para la generación de energía eléctrica en lugares apartados y remotos.

Hoy en día, la tecnología fotovoltaica disponible comercialmente es una alternativa real para su aplicación en diversas tareas domésticas, industriales y agropecuarias. Sin embargo es necesario un análisis de viabilidad económica y factibilidad técnica para determinar si es la más apropiada para tal fin. Las aplicaciones más comunes en el sector agropecuario son bombeo de agua, cercos eléctricos, calentadores de agua, congeladores y sistemas de secado de productos agrícolas, además de la electrificación básica para fines domésticos.

Bombeo de agua con energía solar fotovoltaica



El bombeo de agua en pequeña escala es una aplicación de mucha trascendencia en el mundo; tiene especial impacto en comunidades rurales donde no hay suministro de energía eléctrica convencional. Los sistemas de bombeo fotovoltaicos se caracterizan por ser de alta confiabilidad, larga duración y mínimo mantenimiento, lo cual se traduce en un menor costo a largo plazo si se le compara con otras alternativas. Además no requiere de un operador y tienen un bajo impacto ambiental (no contaminan el aire o el agua y no producen ruido). Otra ventaja es que los sistemas son modulares, de manera que pueden adecuarse para satisfacer las necesidades específicas del usuario en cualquier momento.

Estos sistemas son muy sencillos en su operación. Para realizar un proyecto con éxito es necesario entender conceptos como la energía solar fotovoltaica, la hidráulica del sistema y el funcionamiento del conjunto motor-bomba.



Factibilidad de la operación solar

Los sistemas activados por el sol representan una solución costeable para muchos usuarios alejados de fuentes convencionales de energía eléctrica. Estos sistemas solares tienen algunas ventajas y desventajas que deben considerar cuidadosamente el proyectista y el usuario.

Tabla 1. Ventajas y desventajas del bombeo solar

Ventajas	Desventajas
No consumen combustible	Inversión inicial relativamente alta
Larga vida útil (de 15 a 20 años)	Acceso a servicio técnico limitado
Impacto ambiental mínimo	Producción de agua variable dependiendo de condiciones meteorológicas
Bajos costos de operación y mantenimiento	

El éxito de un proyecto está directamente relacionado con el conocimiento de las condiciones y recursos del sitio. ¿Qué hace que un sitio sea adecuado para bombear agua con el sol? ¿Qué diferencia hay en los recursos de un sitio a otro? ¿Cuál es su costo aproximado? Estas son algunas de las preguntas que el proyectista debe responderse. Esta guía proporciona en los siguientes capítulos las herramientas necesarias para tal fin.

La elaboración de un proyecto de bombeo fotovoltaico es un proceso que requiere de tiempo y recursos; la inversión inicial es relativamente alta y por tanto debe realizarse con cuidado, especialmente si a la vez se están realizando trámites para la obtención de ayuda económica.

Durante el diseño, Básicamente deben considerarse los siguientes puntos:

- La disponibilidad de otras fuentes de energía como la electricidad de la red de distribución, gasolina, diesel, viento, etc.
- La aplicación que se pretende dar al agua extraída, por ejemplo, abrevaderos para ganado, irrigación, consumo humano, etc.
- Las características del bombeo en términos de distancia, volumen, profundidad de la extracción y altura de descarga del agua.
- La disponibilidad del recurso solar, es decir, qué tanta energía solar hay en la región geográfica

Otras fuentes de energía

La disponibilidad de otras fuentes de energía es el primer factor que debe analizarse con cuidado. Por ejemplo, debe investigarse la distancia a la red eléctrica más cercana o la existencia de bombas de motores de combustión interna, ya que podría ser más costoso extender la red hasta el lugar de la obra o rehabilitar los motores de combustión interna. En el caso de la red eléctrica la pregunta inmediata es ¿Qué tan lejos deberá estar la red para que sea rentable su extensión? La respuesta es variable. En zonas desérticas la extensión podría costar unos ocho mil dólares por cada kilómetro, mientras que en zonas montañosas el precio se elevaría a unos veinte mil dólares. Generalmente se considera la opción solar en proyectos en que la red de distribución está a más de medio kilómetro.

Por otra parte, la disponibilidad de combustibles como la gasolina o el diesel a un precio accesible podría hacer que la opción solar sea menos competitiva. En la sección de aspectos económicos de esta guía se ofrece un método para comparar estas alternativas utilizando los costos reales a lo largo de la vida útil de un sistema de bombeo.

Aplicaciones y uso del agua

En los sistemas de bombeo fotovoltaico la demanda de agua se especifica por día, por lo que el siguiente factor en consideración es el uso que se pretende dar al agua bombeada. Las aplicaciones típicas y rentables son aquellas de relativa baja demanda como abrevaderos para ganado y consumo humano. El riego de parcelas de cultivo por lo general no es costoso debido a su gran demanda de agua y bajo valor de las cosechas obtenidas. La excepción es cuando se trata de parcelas e invernaderos con sistemas de riego eficientes y cultivos de baja demanda de agua.

Características del bombeo

El volumen de agua requerido diariamente no es suficiente indicador del tamaño y costo del sistema de bombeo. También debe conocerse la carga dinámica total, CDT (profundidad de bombeo más la altura de descarga más la carga de fricción en la longitud total de la tubería). Por ejemplo, se requiere más energía para extraer un metro cúbico de agua con una CDT de 10 metros que con una CDT de 5 metros.

Una buena indicación del tamaño y costo es el ciclo hidráulico definido como el producto del volumen diario, expresado en metros cúbicos, m^3 (1,000 litros = $1 m^3$), por la CDT, expresada en metros, m [$(m)(m^3)$]. Con estas unidades, el ciclo hidráulico se expresa en unidades de m^4 . Por ejemplo, $5 m^3$ a bombear con una CDT de 15 m dan un ciclo hidráulico de $75 m^4$. Así mismo, $15 m^3$ a bombear con una CDT de 5 m también dan $75 m^4$. En ambos casos la energía requerida es aproximadamente la misma y el costo de estos sistemas es muy similar. ¿Cuándo se considera que la demanda es muy grande para el bombeo solar? La experiencia muestra que un proyecto es económicamente viable cuando el ciclo hidráulico no sobrepasa los $1,500 m^4$. Los sistemas de bombeo de agua con

sistemas de combustión interna o eólicos son más competitivos cuando se tiene un ciclo hidráulico mayor o igual a 1500 m⁴.

Para obtener mayores beneficios, el agua debe utilizarse en productos de alto valor para el propietario. Debe observarse que el agua no sea más cara que el producto. El ciclo hidráulico de un proyecto permite determinar la tecnología más apropiada. Como se mencionó, en general 1,500 m⁴ es una buena cifra para decidir si se implementa un bombeo solar o no. La Figura 1 nos indica la tecnología más apropiada de acuerdo al volumen diario y Y carga dinámica total.

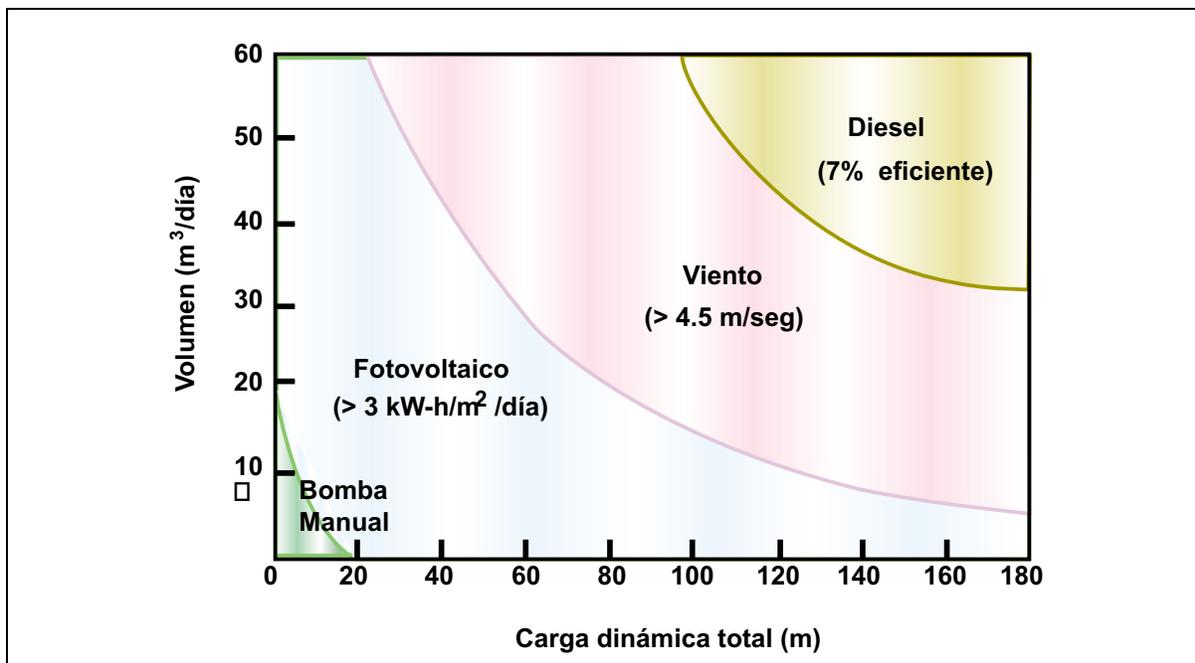


Figura 1. Selección de tecnología de bombeo de acuerdo al ciclo hidráulico.

El uso de esta gráfica es muy sencillo. Sólo se busca la intersección del volumen diario requerido con la carga dinámica total de bombeo. Con frecuencia el punto de intersección está muy cercano entre dos tipos de tecnología. En este caso la recomendación es hacer una comparación rigurosa con el método de análisis de ciclo de vida mostrado en la sección de aspectos económicos.

Esta gráfica se realizó asumiendo una insolación diaria mayor de 3.0 kWh/m², un recurso eólico (es decir, la velocidad promedio del viento) mayor de 4.5 m/s y una eficiencia del 7% para los sistemas Diesel.

Disponibilidad del recurso solar

México cuenta con un excelente recurso solar en casi todo su territorio. En la mayor parte del país, los días son largos y despejados durante el verano. En el campo hay una relación

directa a favor del uso de la energía solar: los días de mayor necesidad de agua son aquellos en que el sol es más intenso.

Existen en la actualidad mapas y tablas que indican la **insolación** mensual promedio para diferentes zonas geográficas. La insolación es la energía proveniente del sol. Una unidad común de insolación es el kWh/m². En esta guía se recomienda que los sitios del proyecto deben contar con al menos 3 kWh/m² de energía solar para justificar el seguimiento del proyecto. En el Apéndice se incluye una tabla con valores de insolación para diversas zonas geográficas de México. Utilice el valor de insolación más cercano al lugar de su proyecto.

Otras consideraciones

Hay “otros” factores de mucha importancia que no son fácilmente cuantificables, entre éstos están:

La disponibilidad de servicio profesional en la región. Una instalación de bombeo solar debe hacerse por personal calificado. Además es importante que el instalador sea fácilmente localizable en caso de requerir sus servicios. El proveedor e instalador deberán demostrar su experiencia , capacidad técnica y solvencia moral

- La aceptación de los usuarios de una tecnología relativamente nueva y desconocida. Los usuarios deben entender la capacidad de estos sistemas, sus limitaciones, sus ventajas, requisitos de mantenimiento y principios de operación. Involucre a los usuarios desde el principio de la realización del proyecto. Esto les permitirá asimilar mejor la nueva tecnología así como les reforzará su sentido de responsabilidad.
- La vigilancia adecuada. La naturaleza y portabilidad de estos sistemas de bombeo solar los hacen ideales para aplicaciones remotas ydesatendidas, pero también los hacen vulnerables al robo yvandalismo.
- El impacto ambiental. La energía solar y su tecnología no contribuyen al deterioro de la calidad del aire ni del agua, no producen ruido y no son peligrosos para la fauna y flora local. Esto en sí mismo es para muchos usuarios de gran valor.

El diagrama de flujo de la Figura 2 muestra una alternativa para llevar a cabo la selección del tipo de tecnología que se puede utilizar para un sistema de bombeo de agua, ya sea un sistema convencional o un sistema solar. El dato más importante que se debe conocer para diseñar un sistema de esta naturaleza, es la demanda que se va a satisfacer. Para la selección se consideran parámetros como la distancia a lared, ciclo hidráulico y el recurso solar que posee el sitio.

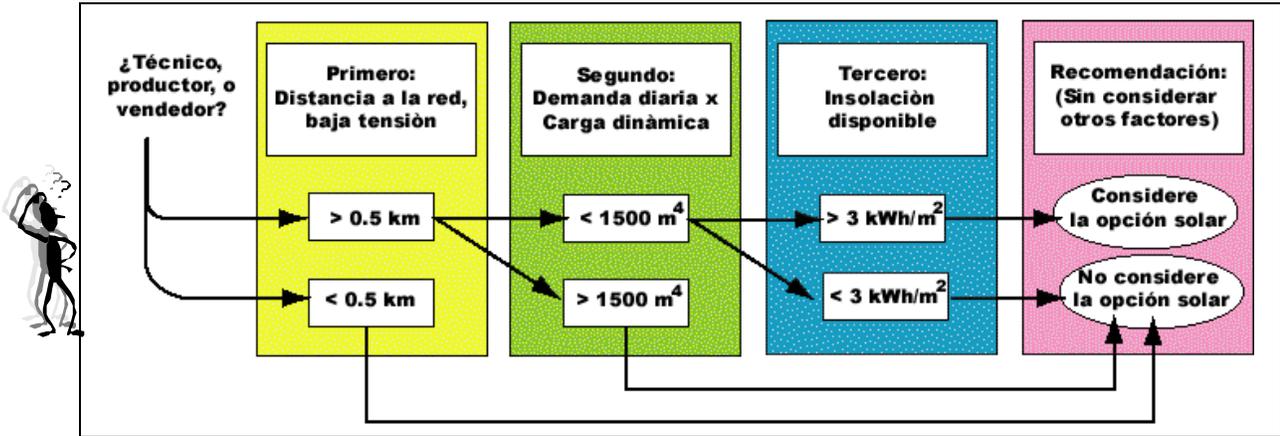


Figura 2. Diagrama de flujo de decisiones para bombeo considerando dos tecnologías de generación de energía.



En los sistemas fotovoltaicos de bombeo de agua, la energía necesaria para accionar la bomba proviene del sol. La energía solar es captada y transformada a energía eléctrica por medio de los dispositivos llamados celdas solares, las cuales son la base de la construcción de los módulos fotovoltaicos. En el presente capítulo se proveerán las herramientas necesarias para entender la naturaleza de la fuente energética, el Sol, así como también de los conceptos básicos de electricidad con los que se debe contar para el buen entendimiento de la operación de los módulos fotovoltaicos.

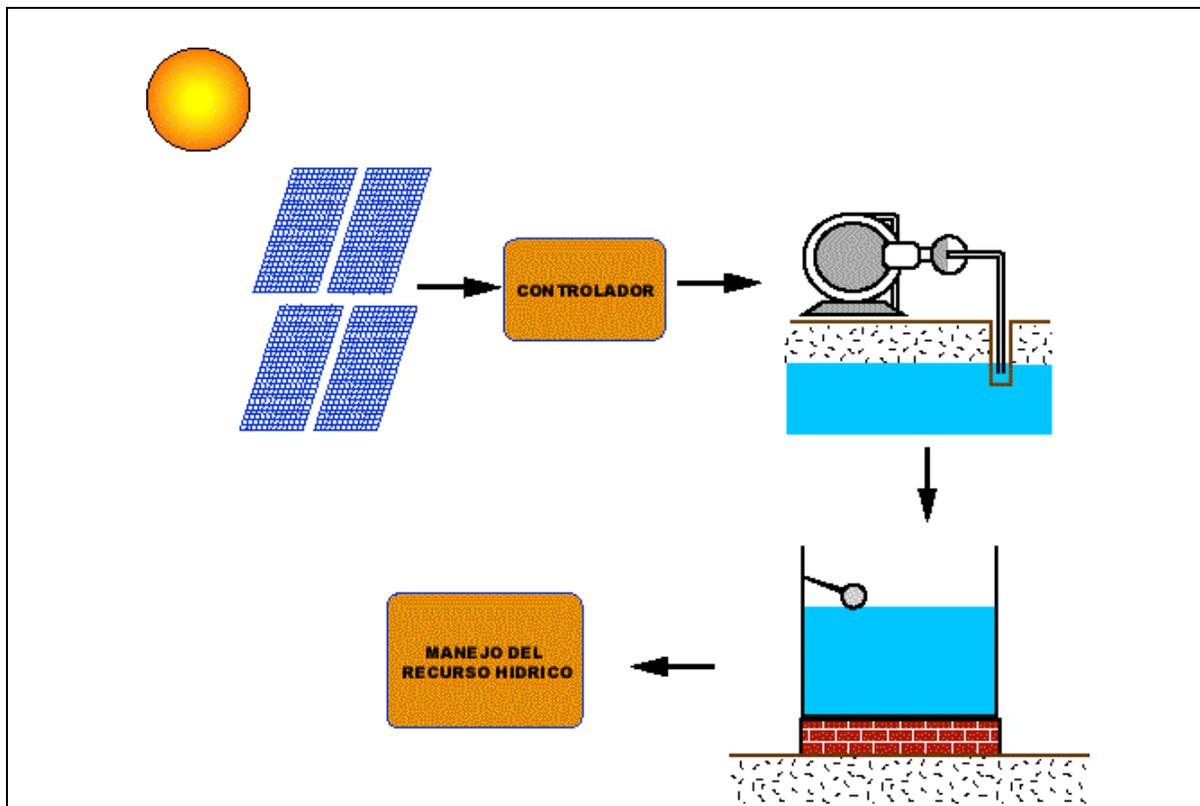


Figura 3. Diagrama de bloques de un sistema fotovoltaico para bombeo de agua.

El recurso solar

El sol es una fuente inagotable de energía debido a magnitud de las reacciones nucleares que ocurren en su centro y corona. Debido a la gran masa con la que cuenta, se puede asegurar que su tiempo de vida es “infinito” comparado con el tiempo de vida del hombre

sobre el planeta tierra. Una gran parte de esta energía llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética llamada comúnmente energía solar, la cual está formada básicamente por “luz” y “calor” .

La potencia de la radiación solar que se recibe en un instante dado sobre un captador de una superficie determinada se le conoce como **Irradiancia** y se mide en unidades de W/m^2 . Dado que la distancia Tierra-sol es “relativamente” fija, el valor de la irradiancia fuera de la atmósfera terrestre, llamada la constante solar, es de $1,353 W/m^2$.

Se sabe que la atmósfera terrestre está constituida por gases, nubes, vapor de agua, partículas contaminantes y sólidos en suspensión, que constituyen lo que se conoce comúnmente como masa de aire (AM por sus siglas en inglés Air Mass). A medida que la luz solar la atraviesa, ésta sufre procesos de absorción, reflexión y refracción, y en consecuencia, la irradiancia se atenúa disminuyendo su valor con respecto a fuera de la atmósfera. Bajo condiciones de atmósfera limpia, sin ningún proceso óptico y estando el sol en el cenit, la irradiancia máxima que un captador podría recibir es de $1,000 W/m^2$ como un valor promedio normalizado.

La radiación que llega a la superficie terrestre se puede clasificar en directa y difusa. La **radiación directa** es aquella que se recibe en la superficie terrestre sin que haya sufrido ninguno de los procesos antes mencionados al pasar por la atmósfera. La **radiación difusa** es la que se recibe después de que la luz solar cambió su dirección debido a los procesos de refracción y reflexión que ocurren en la atmósfera. Un captador de la energía solar “ve” la radiación como si viniera de la bóveda celeste con esas dos componentes (radiación directa y difusa), por lo que en muchas ocasiones se podría tener valores de irradiancia mayores de $1,000 W/m^2$. Para un día despejado, la componente recibida mayormente en el captador es la directa; mientras que en un día nublado, es la componente difusa, ya que la radiación directa es obstruida por las nubes.

A lo largo del día y bajo condiciones atmosféricas iguales, la irradiancia recibida en un captador varía a cada instante, presentando valores mínimos en el amanecer y atardecer, y adquiriendo valores máximos al mediodía; es decir, se espera que a las 10:00 A.M. el valor de la irradiancia sea diferente y menor al que se obtiene a las 1:00 P.M. Lo anterior se explica debido al movimiento de rotación de la tierra (movimiento sobre su propio eje) que hace que la distancia que recorre la luz solar hacia el captador, dentro de la masa de aire, sea mínima al medio día solar (rayos de luz cayendo perpendicularmente sobre el captador) con respecto a otras horas del día.

Otro concepto importante es el de **Insolación**, éste corresponde al valor acumulado de la irradiancia en un tiempo dado. Si el tiempo se mide en horas (h), la insolación tendrá unidades de Watts-hora por metro cuadrado ($W-h/m^2$). Generalmente se reporta este valor como una acumulación de energía que puede ser horaria, diaria, estacional o anual. La insolación también se expresa en términos de **horas solares pico**. Una hora solar pico es equivalente a la energía recibida durante una hora, a una irradiancia promedio de $1,000 W/m^2$ (Figura 4). La **energía** que produce el arreglo fotovoltaico es directamente proporcional a la insolación que recibe.



Figura 4. Irradiancia y horas solares pico (insolación) durante un día soleado.

La trayectoria solar

Además de las condiciones atmosféricas hay otro parámetro que afecta radicalmente a la incidencia de la radiación sobre un captador solar, este es el **movimiento aparente del sol** a lo largo del día y a lo largo del año, ver Figura 5. Se dice "aparente" porque en realidad la Tierra es la que está girando y no el Sol. La Tierra tiene dos tipos de movimientos: uno alrededor de su propio eje (llamado movimiento rotacional) el cual da lugar al día y la noche y el otro; alrededor del sol (llamado movimiento traslacional) siguiendo una trayectoria elíptica, el cual da lugar a las estaciones del año.

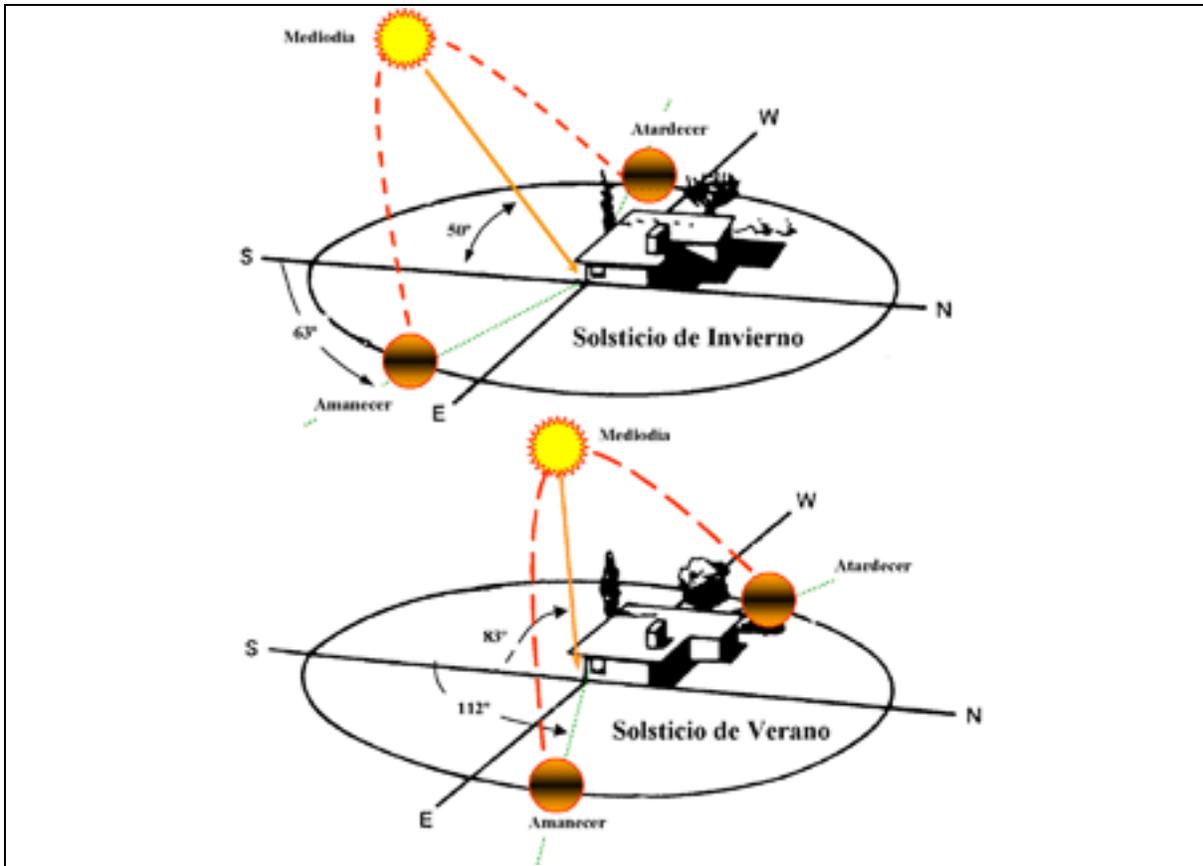


Figura 5. Movimiento aparente del sol en la bóveda celeste en función de la hora del día y la época del año (21 de Diciembre y 21 de Junio respectivamente) para una latitud de 16°N.

Un arreglo fotovoltaico recibe la máxima insolación cuando se mantiene apuntando directamente al sol; es decir, cuando los rayos inciden perpendicularmente en él. Para esto se necesita seguir al sol durante el día y durante todo el año, requiriéndose el ajuste de dos ángulos del arreglo: el **azimut** para seguir el movimiento diario del sol de este a oeste, y el ángulo de **elevación** para seguir el movimiento anual de la trayectoria solar en la dirección norte-sur. Así, para que el arreglo fotovoltaico siga al sol se necesita de estructuras de montaje que estén diseñadas para tal propósito.

Datos de insolación

La insolación es un parámetro clave en el diseño de sistemas solares. Los factores principales que afectan la insolación que recibe la superficie de un captador son su orientación, el ángulo de la superficie respecto de la horizontal y las condiciones climáticas. En lugares donde los días nublados son relativamente más frecuentes, la insolación promedio es menor. Cuando la latitud del lugar sobrepasa los 15°, los días de invierno son apreciablemente más cortos que los días de verano. Esto resulta en una mayor insolación promedio en el verano. Por ejemplo, en las regiones lluviosas del sur de México, la insolación en el plano horizontal alcanza 4 kW-h/m² por día en el invierno, 5.2 kW-h/m²

por día en el verano y 4.5 kW-h/m^2 por día como promedio anual. En las regiones áridas del norte de México, la insolación en el plano horizontal alcanza 5 kW-h/m^2 por día en el invierno, 8 kW-h/m^2 por día en el verano y 6.5 kW-h/m^2 por día como promedio anual. Esta diferencia es básicamente por que en el Sureste del país las lluvias son mas frecuentes y la nubosidad acumulada es mayor durante el verano, lo que no ocurre en las zonas áridas.

Debido a que la insolación recibida en el captador depende de su orientación e inclinación, con respecto a la posición aparente del sol, el **Recurso Solar** de un lugar determinado se especifica por el valor de la insolación medida horizontalmente. A partir de los datos de la insolación en el plano horizontal se puede estimar el valor de la insolación a un azimut y elevación determinado. Existen tablas y mapas de insolación horizontal para diferentes regiones y épocas del año provenientes de varias fuentes. El Apéndice A (pag. A-1) contiene valores de insolación para diferentes regiones de México.

Efecto fotovoltaico

Cuando en un dispositivo se observa una diferencia de voltaje debido a la absorción de la luz solar, se dice que se esta llevando a cabo el **Efecto Fotovoltaico (FV)**. Bajo estas condiciones, si se le conecta una carga, se producirá una corriente eléctrica que será capaz de realizar un trabajo en ella. La corriente producida es proporcional al flujo luminoso recibido en el dispositivo. A la unidad mínima en donde se lleva a cabo el efecto fotovoltaico se le llama **celda solar**

En una celda solar el efecto fotovoltaico se presenta como la generación de voltaje en sus terminales cuando está bajo iluminación. Si a las terminales de la celda solar se le conecta un aparato eléctrico, por ejemplo, una lámpara, entonces ésta se encenderá debido a la corriente eléctrica que circulará a través de ella. Esto representa la evidencia física del efecto fotovoltaico. En la Figura 6 se representa este efecto.

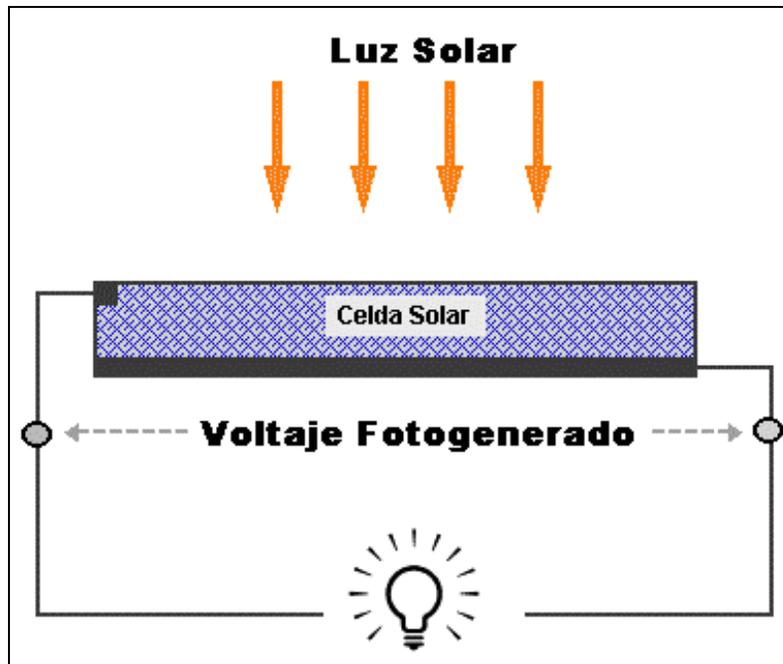


Figura 6. Representación física del efecto fotovoltaico en una celda solar.

Materiales de fabricación

El efecto fotovoltaico se puede llevar a cabo en materiales sólidos, líquidos o gaseosos; pero es en sólidos, especialmente en los materiales semiconductores, en donde se han encontrado eficiencias aceptables de conversión de energía luminosa a eléctrica. Existen diferentes materiales semiconductores con los cuales se pueden elaborar celdas solares, pero el que se utiliza comúnmente es el silicio en sus diferentes formas de fabricación.

Silicio Monocristalino: Las celdas están hechas de un solo cristal de silicio de muy alta pureza. La eficiencia de estos módulos ha llegado hasta el 17%. Los módulos con estas celdas son los más maduros del mercado, proporcionando con esto confiabilidad en el dispositivo de tal manera que algunos fabricantes los garantizan hasta por 25 años.

Silicio Policristalino: Su nombre indica que estas celdas están formadas por varios cristales de silicio. Esta tecnología fue desarrollada buscando disminuir los costos de fabricación. Dichas celdas presentan eficiencias de conversión un poco inferiores a las monocristalinas pero se ha encontrado que pueden obtenerse hasta del orden del 15%. La garantía del producto puede ser hasta por 20 años dependiendo del fabricante.

Silicio Amorfo: La palabra amorfo significa carencia de estructura geométrica. Los átomos de silicio que forman al sólido no tiene el patrón ordenado característico de los cristales como es el caso del silicio cristalino. La tecnología de los módulos de silicio amorfo ha estado cambiando aceleradamente en los últimos años. En la actualidad su eficiencia ha subido hasta establecerse en el rango de 5 a 10% y promete incrementarse. La garantía del producto puede ser hasta por 10 años dependiendo del fabricante.

Principios de la conversión fotovoltaica.

La materia está constituida por átomos, los cuales a su vez están formados por dos partes bien diferenciadas: el núcleo, dotado de una carga eléctrica positiva y los electrones, con carga eléctrica negativa que compensa la del núcleo, formando de esta manera un conjunto eléctricamente neutro. Los electrones más externos se conocen como electrones de valencia.

Los semiconductores son utilizados en la fabricación de las celdas solares porque la energía que liga a los electrones de valencia al núcleo es similar a la energía que poseen los fotones que constituyen a la luz solar. Por lo tanto, cuando la luz solar incide sobre el semiconductor (generalmente silicio), sus fotones suministran la cantidad de energía necesaria a los electrones de valencia para que se rompan los enlaces y queden libres para circular por el material. Por cada electrón que se libera, aparece un hueco. Dichos huecos se comportan como partículas con carga positiva (+). Cuando en el semiconductor se generan pares electrón-hueco debido a la absorción de la luz, se dice que hay una foto-generación de portadores de carga negativos y positivos, los que contribuyen a disminuir la resistencia eléctrica del material. Este es el principio básico de operación de las foto-resistencias.

En la Figura 7, se muestra una estructura simple de una celda solar en donde se ilustra el principio básico de la conversión fotovoltaica. La celda solar consiste en una **unión** de dos capas de materiales semiconductores uno **tipo p** y el otro **tipo n** con contactos eléctricos en la parte superior y en la inferior. El espesor de éste “sándwich” puede variar, desde menos de una micra para el caso de semiconductores muy absorbentes (caso del silicio amorfo), hasta unos cientos de micra para el caso de semiconductores de baja absorción (caso del silicio cristalino). La unión entre las capas n (lado negativo) y p (lado positivo) es la responsable de que se forme un campo eléctrico interno que radica principalmente en la unión.

Cuando la radiación luminosa en forma de fotones es absorbida por los semiconductores se generan, en exceso de su concentración en equilibrio, pares de portadores de carga eléctrica, electrones y huecos, los cuales deben de ser separados para poder usar la energía que cada uno representa. Estos portadores foto-generados viajan bajo un gradiente de concentración hacia la unión en donde son separados por efecto del campo eléctrico. Esta separación envía electrones foto-generados a la capa n y huecos foto-generados a la capa p, creándose una diferencia de potencial entre las superficies superior e inferior de las capas. La acumulación de cargas en las superficies del dispositivo da como resultado un voltaje eléctrico medible externamente. La unidad de medición es el volt. Este voltaje foto-generado es lo que se conoce como el efecto fotovoltaico. Si se establece un circuito eléctrico externo entre las dos superficies, los electrones acumulados fluirán a través de él regresando a

La acumulación de cargas en la superficie del dispositivo da como resultado un voltaje eléctrico medible externamente. La unidad de medición es el Volt. Este voltaje foto-generado es lo que se conoce como el efecto fotovoltaico. Si se establece un circuito eléctrico externo entre las dos superficies, los electrones acumulados fluirán a través de él

regresando a su posición inicial. Este flujo de electrones forma lo que se llama una corriente foto-generada o fotovoltaica.

Bajo condiciones de circuito abierto (**V_{ca}**) el efecto FV genera una diferencia de potencial entre la parte superior y la inferior de la estructura. Bajo condiciones de corto circuito, el proceso genera una corriente eléctrica **I_{cc}** que va de la parte positiva a la negativa (dirección convencional para la corriente eléctrica).

Conceptos básicos de electricidad

Corriente (I), voltaje (V), potencia (P) y energía eléctrica (E) son algunos de los conceptos eléctricos fundamentales que se deben de tener en mente cuando se trata con sistemas fotovoltaicos. La **corriente eléctrica** que circula en el material se define como el número de electrones que fluyen a través de él en un segundo. La corriente I se mide en amperes. El **voltaje eléctrico** V, es el esfuerzo que debe realizar una fuerza externa sobre los electrones dentro del material, para producir la corriente y se mide en Volts. La **potencia eléctrica**, es aquella que se genera o se consume en un instante dado, se especifica por el voltaje que obliga a los electrones a producir la corriente eléctrica continua y se expresa como:

$$P = V \times I$$

La unidad de potencia eléctrica es el Watt (1 Watt = 1 volt x 1 Amper). Y en cuanto a la **energía eléctrica**, E, es la potencia generada o consumida en un periodo de tiempo t y se define como:

$$E = P \times t;$$

si el tiempo de consumo esta dado en horas, entonces las unidades para la energía producida serán: Watt-hora. Otra unidad utilizada es el Joule

$$1 \text{ Joule} = 1 \text{ Watt por segundo,}$$

$$1 \text{ kW-h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$$

La celda solar de silicio cristalino

Las celdas solares comerciales se fabrican con lingotes de silicio de alta pureza (El silicio es un elemento muy abundante en la arena, pero para fabricar las celdas solares se requiere de silicio metalúrgico). El lingote es rebanado en forma de placas delgadas llamadas obleas. El espesor típico usado es del orden de 400 nm (0.4 μm). Una fracción muy pequeña de tal espesor (del orden de 0.5 nm) es impregnado con átomos de fósforo. A esta capa se le conoce como tipo-n. El resto de la oblea es impregnada con átomos de boro y se forma la capa conocida como tipo-p. Estas capas unidas forman el campo eléctrico (voltaje interno construido) que se necesita para la separación de los portadores que se foto-

El valor típico para la densidad de corriente a corto circuito en celdas solares de silicio cristalino comerciales bajo **condiciones estándares de medición (irradiancia de 1000 W/m² a una temperatura de celda de 25°C)** es del orden de 40 mA/cm²; es decir, una celda solar de 100 cm² de área producirá una I_{sc} del orden de 4.0 A.

Voltaje a circuito abierto (V_{ca}), (V_{oc} por sus siglas en inglés): Es el voltaje máximo que genera la celda solar. Este voltaje se mide cuando no existe un circuito externo conectado a la celda.

Bajo condiciones estándares de medición, el valor típico del voltaje a circuito abierto que se ha obtenido en una celda solar de silicio cristalino es del orden de 0.600 V.

Máxima potencia generada (P_m): Su valor queda especificado por una pareja de valores I_m y V_m cuyo producto es máximo. La eficiencia de conversión de la celda, η , se define como el cociente entre el valor de la máxima potencia generada, P_m, y la potencia de la radiación luminosa o irradiancia, P_i. Para una celda solar de silicio cristalino comercial con una eficiencia del 17%, la potencia máxima generada en 100 cm² de captación cuando sobre la celda incide 1000 W/m² es de 1.7 W (V_m= 0.485 V; I_m=3.52 A).

Módulo fotovoltaico

El bajo voltaje producido por la celda solar no es suficiente para todas las aplicaciones en donde se pueda usar. Para que se pueda generar una potencia útil, las celdas se agrupan en lo que se denomina el módulo solar o fotovoltaico. Este conjunto de celdas deben estar convenientemente conectadas, de tal forma que reúnan las condiciones óptimas para su integración en sistemas de generación de energía, siendo compatibles con las necesidades y los equipos estándares existentes en el mercado. Las celdas se pueden conectar en serie o en paralelo.

Comercialmente, las celdas solares se conectan en serie, se agrupan, se enlaminan y se empaquetan entre hojas de plástico y vidrio, formando la unidad del módulo solar. El módulo tiene un marco (usualmente de aluminio) que le da rigidez y facilidad en el manejo y transportación. Además, en éste se encuentran las cajas de conexiones eléctricas para conectar el cableado exterior. El número de celdas que contienen los módulos depende de la aplicación para la que se necesite. Es costumbre configurar el número de celdas conectadas en serie para tener módulos que sirvan para cargar acumuladores (o baterías) de 12 Volts. Se pueden encontrar módulos de 30, 33 y 36 celdas conectadas en serie disponibles comercialmente. Estos módulos proporcionan un voltaje de salida que sirve para cargar baterías a 12 Volts más un voltaje extra que sirve para compensar las caídas de tensión en los circuitos eléctricos así como en los sistemas de control y manejo de energía.

El comportamiento eléctrico de los módulos está dado por las curvas de corriente contra voltaje (**curva I vs V**) o potencia contra voltaje (**curva P vs. V**) que los caracteriza. La curva de potencia se genera multiplicando la corriente y el voltaje en cada punto de la curva I vs. V. La Figura 8 muestran curvas I vs. V y P vs. V para un módulo fotovoltaico típico.

Bajo condiciones estándares de prueba cada modelo de módulo tiene una curva I vs. V característica (o P vs. V).

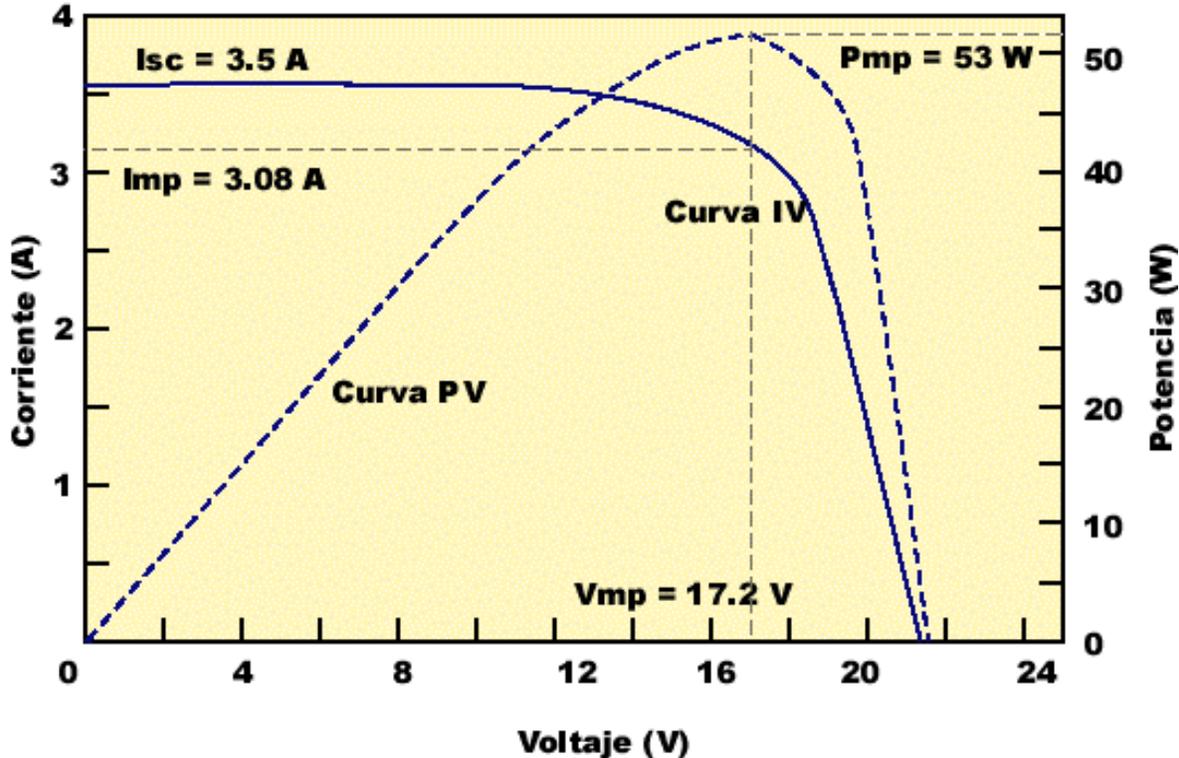


Figura 8. Curva I vs V y P vs V para un módulo fotovoltaico típico a 1,000 W/m² y 25°C

En la curva de potencia contra voltaje, existe un valor de voltaje, el Vp para el cual la potencia es **máxima**. La **potencia máxima** del módulo se le simboliza por **Pp** y representa la capacidad nominal de generación o **potencia pico** del módulo, y con su valor se evalúa la eficiencia de conversión del módulo.

La potencia pico queda definida por una pareja de valores de corriente y voltaje, Ip y Vp, los que definen una resistencia de carga R_L . Cuando una carga eléctrica con resistencia R_L se conecta al módulo, la transferencia de energía del módulo a la carga es máxima, y se dice que Ip y Vp corresponden a la corriente y voltaje de operación de la carga eléctrica. Sin embargo, en aplicaciones reales no siempre sucede que la resistencia de la carga eléctrica es R_L . En este caso se tienen un desacoplamiento en la curva de potencia y la transferencia no es máxima, el módulo opera lejos del punto de máxima potencia y la potencia entregada se reduce significativamente; en consecuencia se tendrán pérdidas de energía.

Otros parámetros de importancia son: la **corriente de corto circuito**, (I_{cc}): (I_{sc} en la figura), que es la corriente máxima generada por el módulo para cero potencia; y el **voltaje de circuito abierto** (V_{ca}), máximo voltaje producido por el módulo.

La potencia máxima o tamaño de los módulos comerciales varía entre 25 y 300 Watts. El voltaje Vp de la mayoría de los módulos fluctúa entre los 15 Volts (30 celdas en serie) y 17.5 Volts (36 celdas en serie). Cada módulo tiene en su parte posterior una placa del fabricante con el modelo y las especificaciones eléctricas. Por ejemplo, la placa en la parte

posterior del módulo VLX-53, cuyas características se mencionan en la Figura 8 se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Placa del fabricante de un módulo Solarex VLX-53

Modelo	VLX-53
Pp	53 W
Vp	17.2 V
Ip	3.08 A
Vca	21.5 V
Icc	3.5 A
Condiciones	1000 W/m ² , 25° C

El funcionamiento del módulo fotovoltaico se ve afectado por la intensidad de la radiación y de la temperatura. La Figura 9 muestra el comportamiento de la corriente producida en función del voltaje para diferentes intensidades de la radiación solar. Se presenta un aumento proporcional de la corriente producida con el aumento de la intensidad. También se debe observar que el voltaje a circuito abierto Vca, no cambia lo cual demuestra un comportamiento casi constante a los cambios de iluminación.

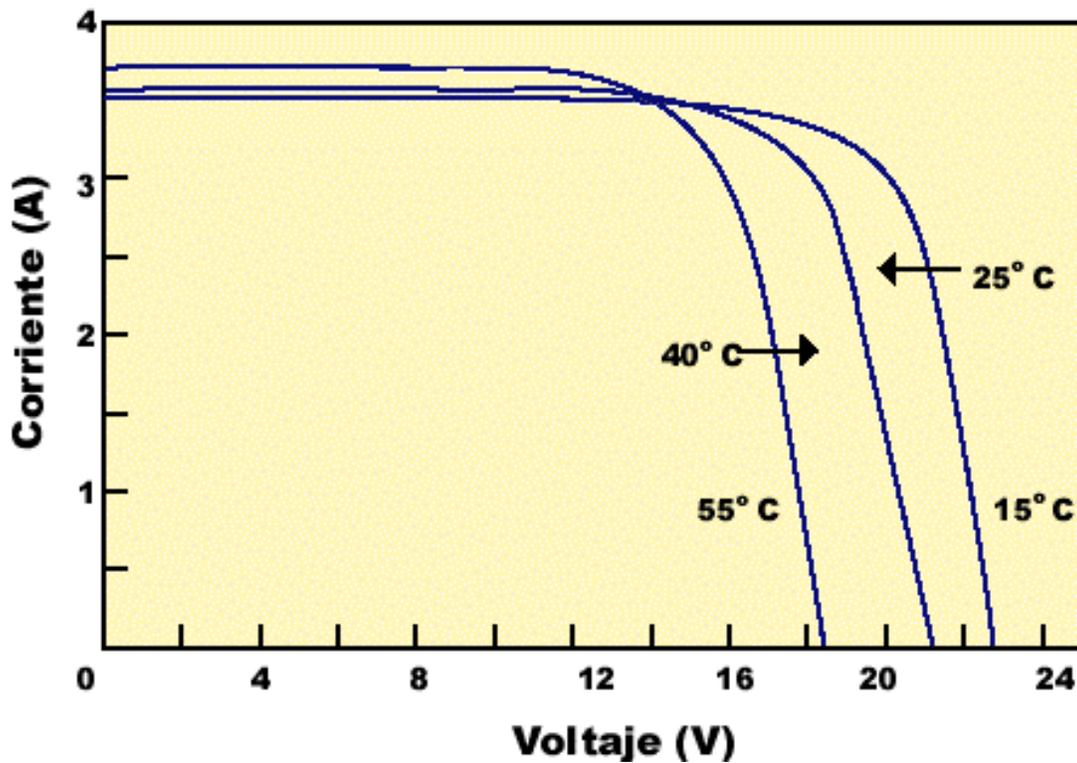


Figura 9. Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes intensidades de radiación (temperatura constante de 25°C)

En la Figura 10 se muestra el efecto que produce la temperatura sobre la producción de potencia en el módulo. Esta vez, el efecto se manifiesta en el voltaje del módulo. La potencia nominal se reduce aproximadamente 0.5% por cada grado centígrado por encima de 25°C; es decir, un módulo de 50 W pico bajo condiciones estándares de medición perderá 12.5% de su potencia nominal cuando este operando a 50°C.

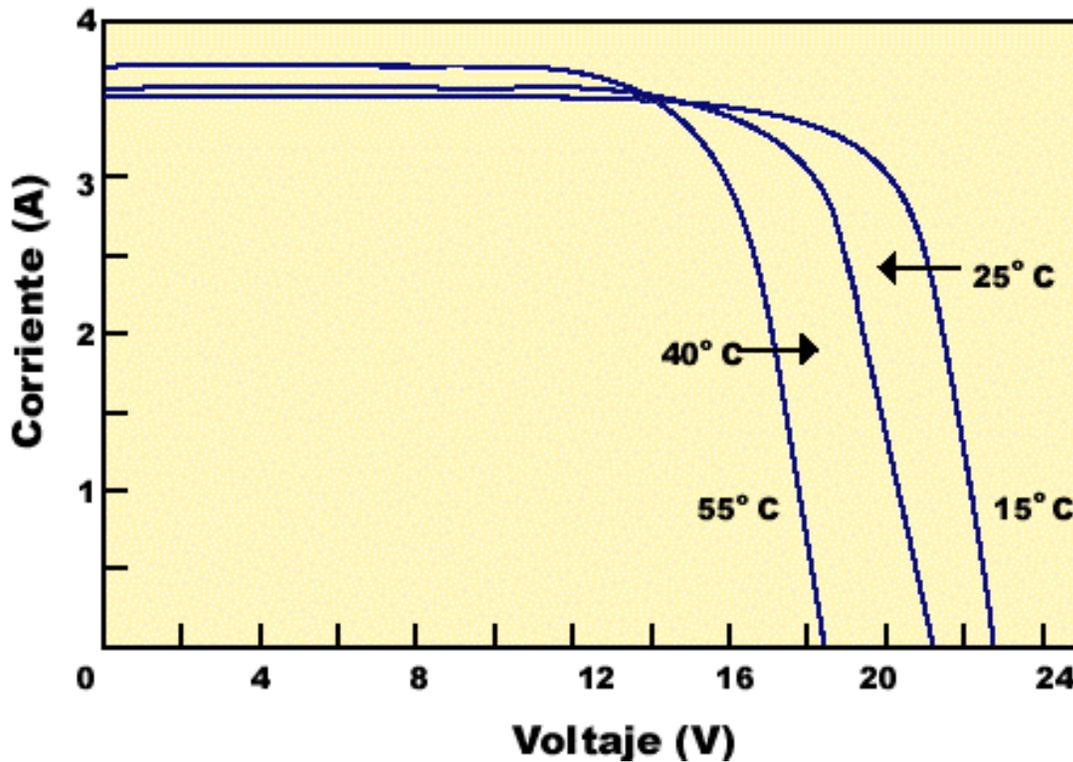


Figura 10. Dependencia de la corriente producida en función del voltaje para diferentes temperaturas de operación (irradiancia constante 1,000W/m²)

El módulo FV es el componente más confiable del sistema. Es la calidad de la instalación, especialmente las interconexiones entre los módulos, lo que determina la confiabilidad del arreglo FV en su conjunto

Arreglos fotovoltaicos

Un arreglo FV es un conjunto de módulos conectados eléctricamente en serie y/o paralelo. Las características eléctricas del arreglo son análogas a la de módulos individuales, con la potencia, corriente y voltaje modificados de acuerdo al número de módulos conectados en serie y en paralelo.

Incrementando el voltaje: Los módulos solares se conectan en serie para obtener voltajes de salida mas grandes. El voltaje de salida, V_s , de módulos conectados en serie esta dado por la suma de los voltajes generados por cada módulo.

$$V_s = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$$

Una forma fácil de entender el concepto de sistemas conectados en serie, es mediante la analogía presentada en la Figura 11 entre un sistema hidráulico y un eléctrico. Como se

puede observar en el sistema hidráulico (izquierda) el agua que cae desde cuatro veces la altura de 12 metros produce una caída de agua con cuatro veces la presión a la misma tasa de flujo, 2 L/s. La cual se puede comparar con los 48 voltios que el sistema eléctrico (derecha) alcanza al pasar una corriente de 2 amperios por cuatro módulos conectados en serie. La corriente se compara con el flujo ya que ambas permanecen constantes en el circuito, y el voltaje es análogo al papel de la presión en el sistema hidráulico.

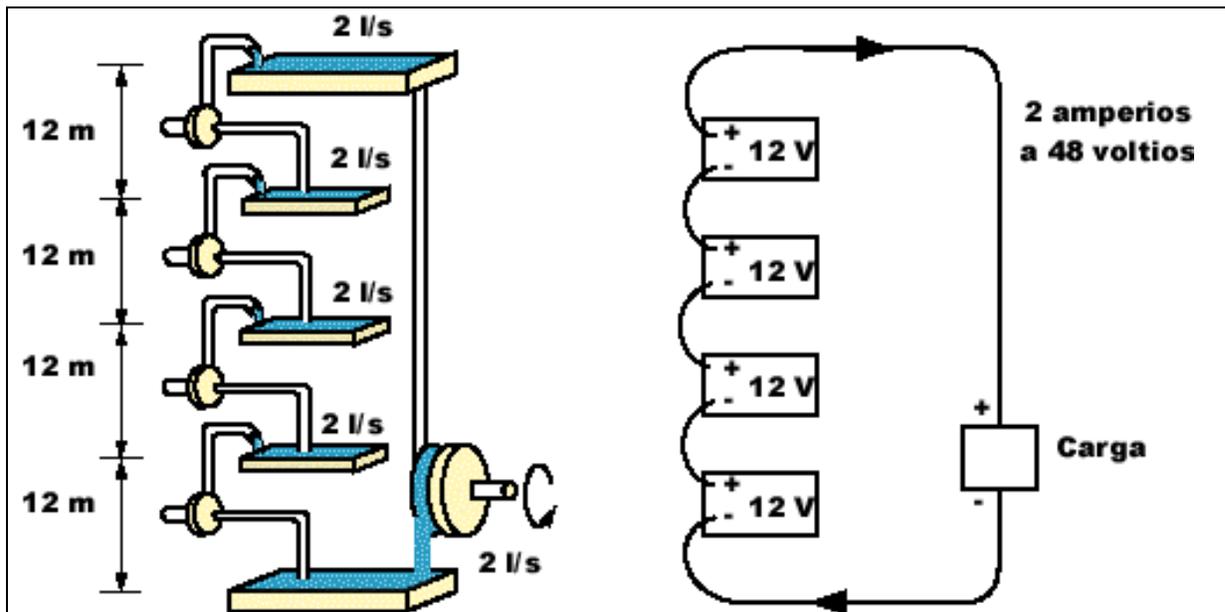


Figura 11. Analogía de una conexión en serie entre un sistema eléctrico y un hidráulico

Incrementando la corriente: Los módulos solares o paneles se conectan en paralelo para obtener corrientes generadas mas grandes. El voltaje del conjunto es el mismo que el de un módulo (o un panel); pero la corriente de salida, I_s , es la suma de cada unidad conectada en paralelo.

$$I_s = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

De manera similar al sistema conectado en serie, los sistemas conectados en paralelo también pueden ser comparados en un sistema hidráulico, tal y como se muestra en la Figura 12. En el sistema hidráulico (arriba) el agua que cae de la misma altura, da la misma presión que cada bomba individual, pero el flujo es igual al total de los flujos de toda las bombas. Entonces en el sistema eléctrico, el voltaje permanece constante y la corriente de salida de los cuatro módulos es sumada, produciendo 8 amperes de corriente a 12 voltios.

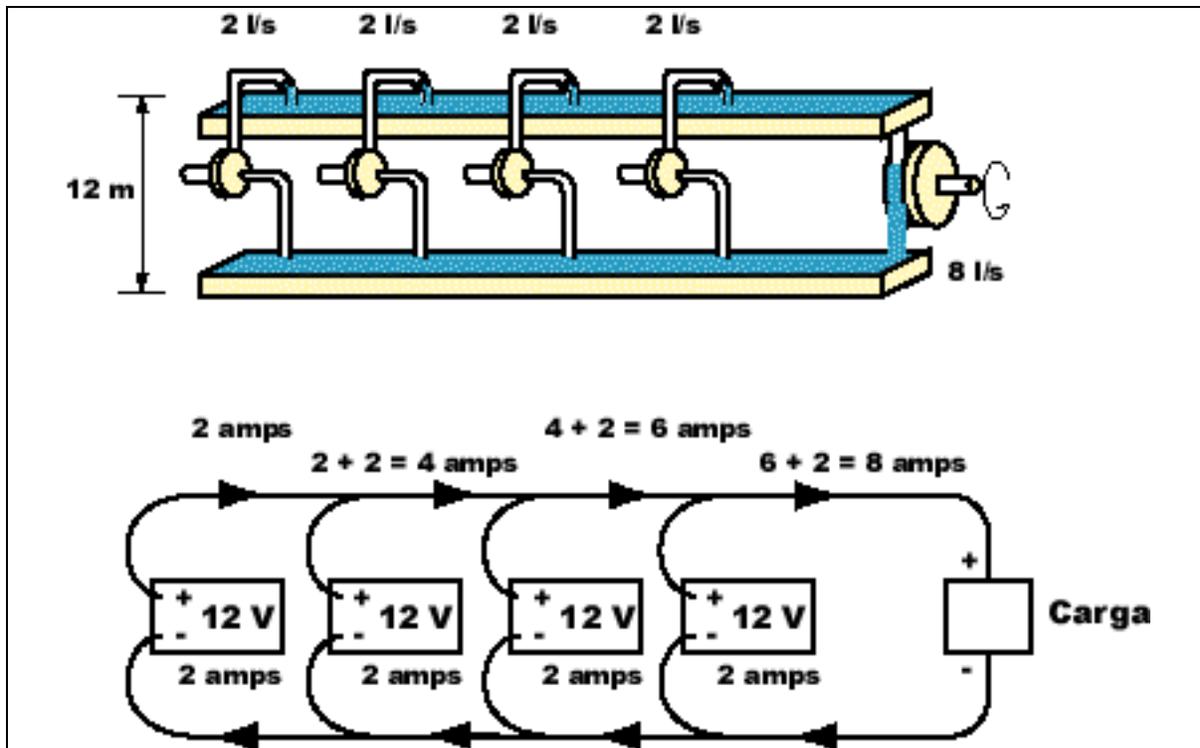


Figura 12. Analogía de una conexión en paralelo entre un sistema eléctrico y un hidráulico

Para evitar el flujo de corriente en la dirección opuesta se utilizan **diodos de bloqueo**. Y los diodos de paso, proporcionan un camino de alivio para evitar que circule corriente por un panel o un módulo sombreado (sombra de nubes o de objetos). Un módulo sombreado no genera energía, por lo cual, los demás módulos lo verán como un punto de resistencia. En consecuencia, fluirá corriente hacia él convirtiéndose en un punto caliente del arreglo. Aumentará su temperatura y se degradará aceleradamente.

En la Figura 13 se muestra un ejemplo de módulos conectados en serie y en paralelo. En ella también se muestra la posición de los diodos de paso y el diodo de bloqueo. Este último debe ser calculado tomando en consideración la máxima corriente que generará el arreglo fotovoltaico en condiciones de corto circuito. La norma internacional dice que el valor de la corriente que soporta el diodo debe ser por lo menos 1.56 veces el valor de la corriente circuito del arreglo de corto.

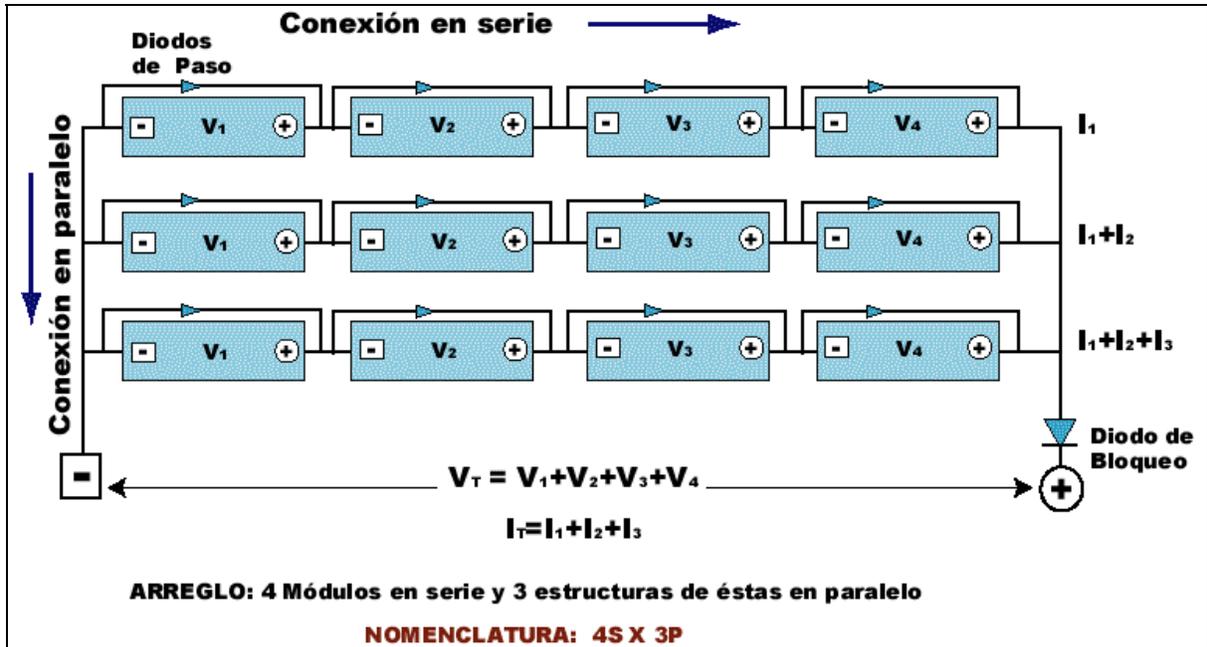


Figura 13. La conexión de módulos fotovoltaicos

Finalmente, la potencia nominal del arreglo es la suma de la potencia nominal de cada módulo.

Ejemplo 1:

16 módulos FV como el de la Tabla 2 han sido interconectados para accionar un equipo de bombeo de agua. El arreglo consta de 8 módulos en serie y 2 hileras de éstas en paralelo. La curva I vs V y P vs V que describe el comportamiento del arreglo tendrá la misma forma que las curvas de la Figura 8, pero con los siguientes parámetros: $I_p = 3.08 \times 2 = 6.16$ A, $V_p = 17.2 \times 8 = 137.6$ V, $P_p = 53 \times 16 = 848$ W-p; corriente máxima del arreglo $I_{cc} = 3.5 \times 2 = 7.0$ A; voltaje máximo del arreglo $V_{ca} = 21.5 \times 8 = 172$ V. Estos valores corresponden a las características eléctricas bajo condiciones estándares de medición: AM1.5, Irradiancia= 1.0 kW/m²; y la temperatura de operación de cada módulo T= 25°C .

Inclinación del arreglo fotovoltaico

La máxima energía se obtiene cuando los rayos solares llegan perpendiculares a la superficie del captador. En el caso de arreglos fotovoltaicos la perpendicularidad entre las superficies de los módulos y los rayos solares solo se puede conseguir si las estructuras de montaje del arreglo se mueven siguiendo al Sol.

Existen estructuras de soporte del arreglo que ajustan automáticamente el azimut y/o la elevación. Estas estructuras de montaje se llaman **seguidores**. Generalmente el ángulo de elevación del arreglo es fijo. En algunos casos se usan seguidores azimutales. Dependiendo de la latitud del lugar, los seguidores azimutales pueden incrementar la insolación promedio anual hasta en un 25%.

En el caso de que no se tenga un seguidor solar, el arreglo se monta en una estructura fija como se muestra en la Figura 14. Este montaje tiene la ventaja de ser muy sencillo. Debido a que el ángulo de elevación del Sol cambia durante el año, se debe tener un criterio de selección del ángulo óptimo del arreglo que garantice la máxima producción de energía eléctrica. En el hemisferio Norte el Sol se declina hacia el Sur, por lo cual se requiere que los arreglos fijos se coloquen inclinados (respecto de la horizontal) viendo hacia el Sur.

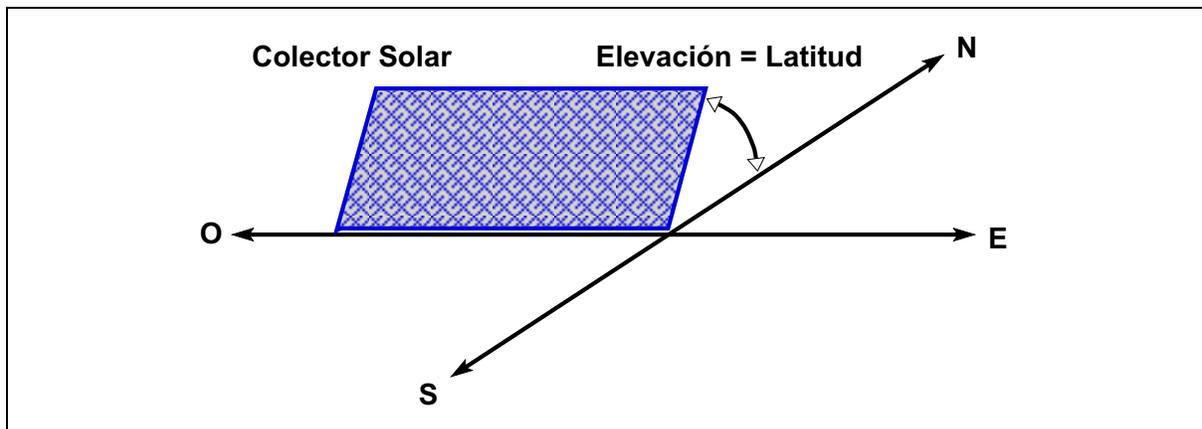


Figura 14. Orientación de una estructura fija para maximizar la captación de radiación solar a lo largo del año

Regla de Mano:

- La inclinación del arreglo se selecciona para satisfacer la demanda de agua durante todo el año.
- Si se desea bombear la máxima cantidad de agua al año, la inclinación del arreglo deberá de ser igual al valor de la latitud del lugar.

Se ha visto que la energía que entrega un módulo o arreglo fotovoltaico depende de la irradiancia y la temperatura. Es posible estimar la energía eléctrica (en kWh/día) que se espera de un arreglo de cierta potencia nominal utilizando las siguientes aproximaciones:

1. Los módulos fotovoltaicos instalados en una estructura anclada al suelo trabajan aproximadamente a 55°C durante el día, 30°C por encima de las condiciones estándares de prueba (25°C). Esto significa que la capacidad real del arreglo es

aproximadamente 15% menor que su potencia nominal. Es decir, su capacidad real es 85% de la capacidad nominal.

2. La energía eléctrica (kWh) esperada es el producto de la capacidad real del arreglo (en kW) por la insolación (en horas solares pico) al ángulo de elevación del arreglo. La energía fotovoltaica generada varía con la época del año, de acuerdo a los cambios en los niveles de insolación.
3. Si se usa un seguidor azimutal, la energía disponible se aumenta hasta en un 25%.

Ejemplo 2:

El arreglo del Ejemplo 1 fue instalado en la granja familiar “El Jeromín,” cerca de Aldama, Chihuahua, México. El arreglo tiene un azimut en la dirección del sur verdadero y una inclinación fija igual a la latitud (30°N). No se usa seguidor azimutal. La capacidad real del arreglo trabajando a una temperatura de celda de 55°C es de $0.85 \times 0.848 \text{ kW} = 0.72 \text{ kW}$. De acuerdo a las tablas del Apéndice, la insolación esperada es de 6.1 kWh/m^2 por día en el primer trimestre del año, y 6.6 kWh/m^2 por día en el tercer trimestre del año. La energía que se puede esperar del arreglo es, aproximadamente, $6.1 \times 0.72 = 4.4 \text{ kWh}$ por día en el primer trimestre, y $6.6 \times 0.72 = 4.8 \text{ kWh}$ por día en el tercer trimestre.

Si el mismo arreglo se instala con una inclinación 15° (latitud menos 15°), la insolación estimada para este ángulo es de 5.7 kWh/m^2 por día en el primer trimestre, y 6.9 kWh/m^2 en el tercer trimestre. En este caso, la energía eléctrica esperada es de 4.1 kWh y 5.0 kWh por día en el primer y tercer trimestre, respectivamente.



Figura 15. Sistema de bombeo de agua energizado con 16 módulos solares.



Hidráulica del sistema de bombeo

Antes de determinar el tamaño de un sistema de bombeo de agua, es necesario entender los conceptos básicos que describen las condiciones hidráulicas de una obra. El tamaño del sistema está en relación directa con el producto de la Carga Dinámica Total (CDT) y el volumen de agua diario necesario. Este producto se conoce como **ciclo hidráulico**.

La carga dinámica total es la suma de la carga **estática** (CE) y la carga **dinámica** (CD):

$$CDT = CE + CD = [\text{Nivel estático} + \text{altura de la descarga}] + [\text{abatimiento} + \text{fricción}]$$

Carga estática

La primera parte, la carga estática, puede obtenerse con mediciones directas. Se trata de la distancia vertical que el agua se desplaza desde el nivel del espejo del agua antes del abatimiento del pozo hasta la altura en que se descarga el agua. La carga estática es entonces la suma del nivel estático y la altura de la descarga. La Figura 16 muestra estos componentes hidráulicos que conforman la carga estática.

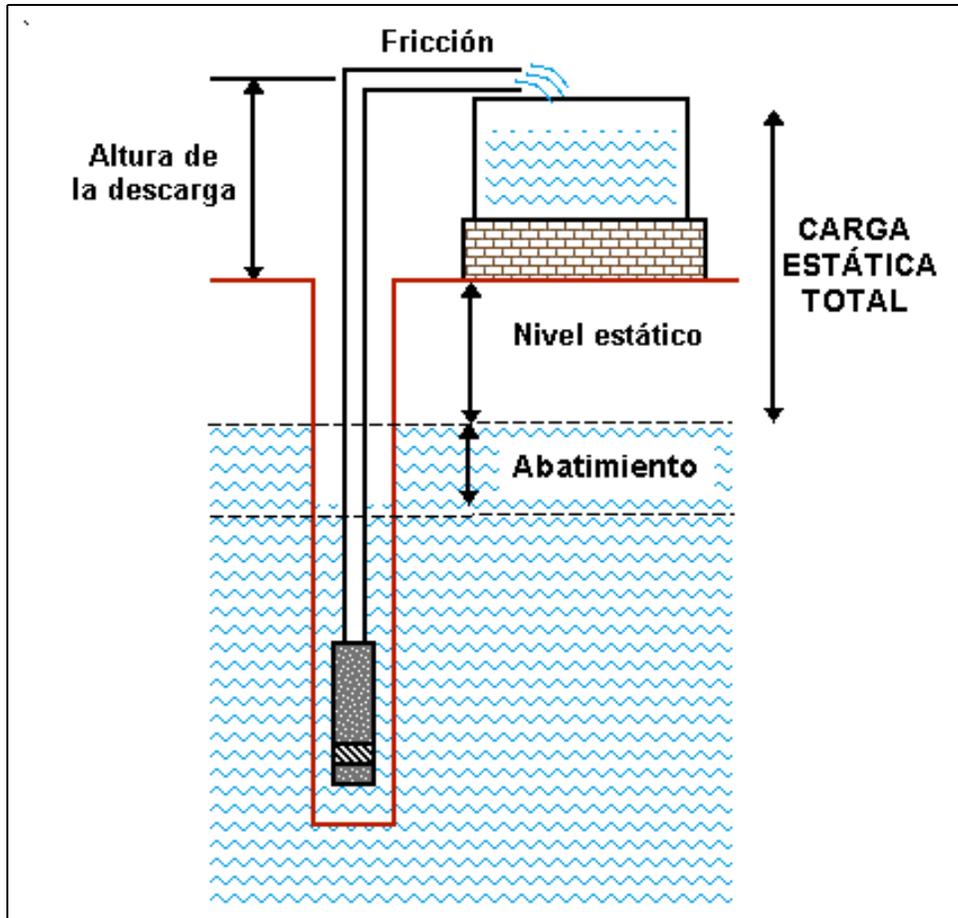


Figura 16. Principales componentes hidráulicos de un sistema de bombeo de agua

Carga dinámica (Fricción)

Todos los pozos experimentan el fenómeno de abatimiento cuando se bombea agua. Es la distancia que baja el nivel del agua debido a la constante extracción .

La carga dinámica, es el incremento en la presión causado por la resistencia al flujo al agua debido a la rugosidad de las tuberías y componentes como codos y válvulas. Esta rugosidad depende del material usado en la fabricación de las tuberías. Los tubos de acero producen una fricción diferente a la de los

Carga dinámica (Fricción)

La carga dinámica, es el incremento en la presión causado por la resistencia al flujo al agua debido a la rugosidad de las tuberías y componentes como codos y válvulas. Esta rugosidad depende del material usado en la fabricación de las tuberías. Los tubos de acero producen una fricción diferente a la de los tubos de plástico PVC de similar tamaño. Además, el diámetro de los tubos influye en la fricción. Mientras más estrechos, mayor resistencia producida.

Para calcular la carga dinámica, es necesario encontrar la distancia que recorre el agua desde el punto en que el agua entra a la bomba hasta el punto de descarga, incluyendo las distancias horizontales, así como el material de la línea de conducción y su diámetro. Con esta información se puede estimar la carga dinámica de varias maneras.

Valor por omisión

La carga dinámica es aproximadamente el **2% de la distancia de recorrido** del agua o lo que es equivalente a la longitud total **L** de la tubería. Por lo general el resultado es una estimación conservadora si se asume que los sistemas de bombeo solar típicos tienen flujos de menos de 1 L/s y las bombas recomendadas se conectan a tuberías de diámetro amplio.

Tablas de fricción

Existen tablas publicadas por fabricantes que indican el porcentaje de pérdidas por fricción que debe considerarse en base al caudal, diámetro y material de las tuberías. Esta guía incluye en el Apéndice unas tablas de fricción para tuberías de plástico PVC y acero galvanizado.

Fórmula de Manning

Este es un método matemático que se puede realizar fácilmente con una calculadora de bolsillo. La fórmula de Manning se expresa así:

$$H_f = \kappa \times L \times Q^2$$

Donde:

H_f es el incremento en la presión causada por la fricción y expresada en distancia lineal (m).

κ es una constante empírica con unidades de (m³/s)⁻²

L es la distancia total recorrida por el agua por las tuberías. Su unidad es metros (m).

Q es el flujo expresado en metros cúbicos por segundo (m³/s).

La constante κ se obtuvo después de experimentar con varios materiales y tamaños de tuberías de ahí que se denomine “empírica”. La Tabla 3 proporciona estos valores de κ en (m³/s)⁻² para tuberías de plástico PVC y acero galvanizado.

Tabla 3. Valores de la constante κ usado en la fórmula de Manning

Material	Diámetro en pulgadas				
	0.5	0.75	1	1.5	2
PVC	9,544,491	1,261,034	291,815	31,282	7,236
Galvanizado	19,909,642	2,631,046	608,849	65,263	15,097

Ejemplo 3

El sistema instalado en la granja “El Jeromín” se diseñó con los siguientes datos:

Nivel estático del agua:	25 m
Abatimiento:	4 m
Altura de la descarga:	9.20 m
Distancia al depósito:	3 m
Requerimiento diario:	12,500 l/día

La bomba seleccionada se conectó a una tubería de 1.5” de diámetro. Se seleccionó material PVC por ser económico y durable. Se desea encontrar la CDT, que es la suma de la CE más la CD.

La carga estática se calcula con la adición de las distancias

$$\begin{aligned} CE &= \text{Nivel estático} + \text{Abatimiento} + \text{Altura de la descarga} \\ CE &= 25 \text{ m} + 4 \text{ m} + 9.20 \text{ m} = \mathbf{38.20 \text{ m}} \end{aligned}$$

La CD se puede obtener de tres formas:

1.- Por omisión:

$$\begin{aligned} 2\% \text{ de } L \text{ es: } CD &= 0.02 \times L = 0.02 \times (25 \text{ m} + 4 \text{ m} + 9.20 \text{ m} + 3 \text{ m}) \\ &= 0.02 \times 41.20 \text{ m} = \mathbf{0.82 \text{ m}} \end{aligned}$$

entonces,

$$CDT = CE + CD = 38.20 \text{ m} + 0.82 \text{ m} = \mathbf{39.02 \text{ m}}$$

2.- Usando las tablas de fricción:

El Jeromín se encuentra en Chihuahua y para este ejemplo se consideró que el recurso solar es de aproximadamente 6.4 horas solares en el mes crítico. Es decir, se considerará que el sistema trabajará 6.4 horas diarias. En 6.4 horas hay 23,040 segundos. El requerimiento diario es de 12,500 litros por día. Este dato nos permite encontrar el caudal Q.

$$Q = 12,500 \text{ l} / 23,040 \text{ s} = 0.543 \text{ l/s.}$$

Localice las tablas de fricción en el Apéndice. Se selecciona la tabla de tubería PVC y se localiza la hilera con el flujo más aproximado a 0.543 l/s. En este caso se encuentra que la hilera con 0.55 l/s y la columna de 1.5 pulgadas corresponden al valor de 0.78%. Por tanto:

$$CD = \text{Fricción} = 0.0065 \times L = 0.0078 \times 41.20 \text{ m} = \mathbf{0.32 \text{ m}}$$

por lo tanto,

$$CDT = CE + CD = 38.20 \text{ m} + 0.32 \text{ m} = \mathbf{38.52 \text{ m}}$$

Usando la fórmula de Manning:

El volumen 12,500 litros es equivalente a 12.5 m^3 y por tanto

$$Q = 5.43 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Así,

$$CD = H_f = \kappa \times L \times Q^2 = 31,282 (\text{m}^3/\text{s})^{-2} \times 41.20 \text{ m} \times (5.43 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s})^2 = \mathbf{0.35 \text{ m}}$$

La Carga Dinámica Total es entonces

$$CDT = CE + CD = 38.20 \text{ m} + 0.35 \text{ m} = \mathbf{38.55 \text{ m}}$$



Bombeo fotovoltaico

Actualmente hay miles de sistemas de bombeo FV en operación en granjas y ranchos alrededor del mundo. Los sistemas fotovoltaicos pueden satisfacer un amplio rango de necesidades que van desde pequeños hatos (menos de 20 cabezas de ganado) hasta requerimientos moderados de irrigación. Los sistemas de bombeo solar son sencillos, confiables y requieren de poco mantenimiento. Tampoco se requiere combustible. Estas ventajas deben considerarse cuidadosamente cuando se comparen los costos iniciales de un sistema convencional con un sistema de bombeo solar.

Un sistema de bombeo FV es similar a los sistemas convencionales excepto por la fuente de potencia. Un sistema FV típico se muestra en la Figura 17. Los componentes principales que lo constituyen son: un arreglo de módulos FV, un controlador, un motor y una bomba. El arreglo se puede montar en un seguidor pasivo para incrementar el volumen y el tiempo de bombeo. Se emplean motores de corriente alterna (CA) y de corriente continua (CC). Las bombas pueden ser centrífugas o volumétricas. Generalmente el agua se almacena en un tanque. En esta sección *Bombeo fotovoltaico* se explica brevemente cada uno de estos componentes excepto el arreglo FV, el cual se explica en la sección de *Energía fotovoltaica*.

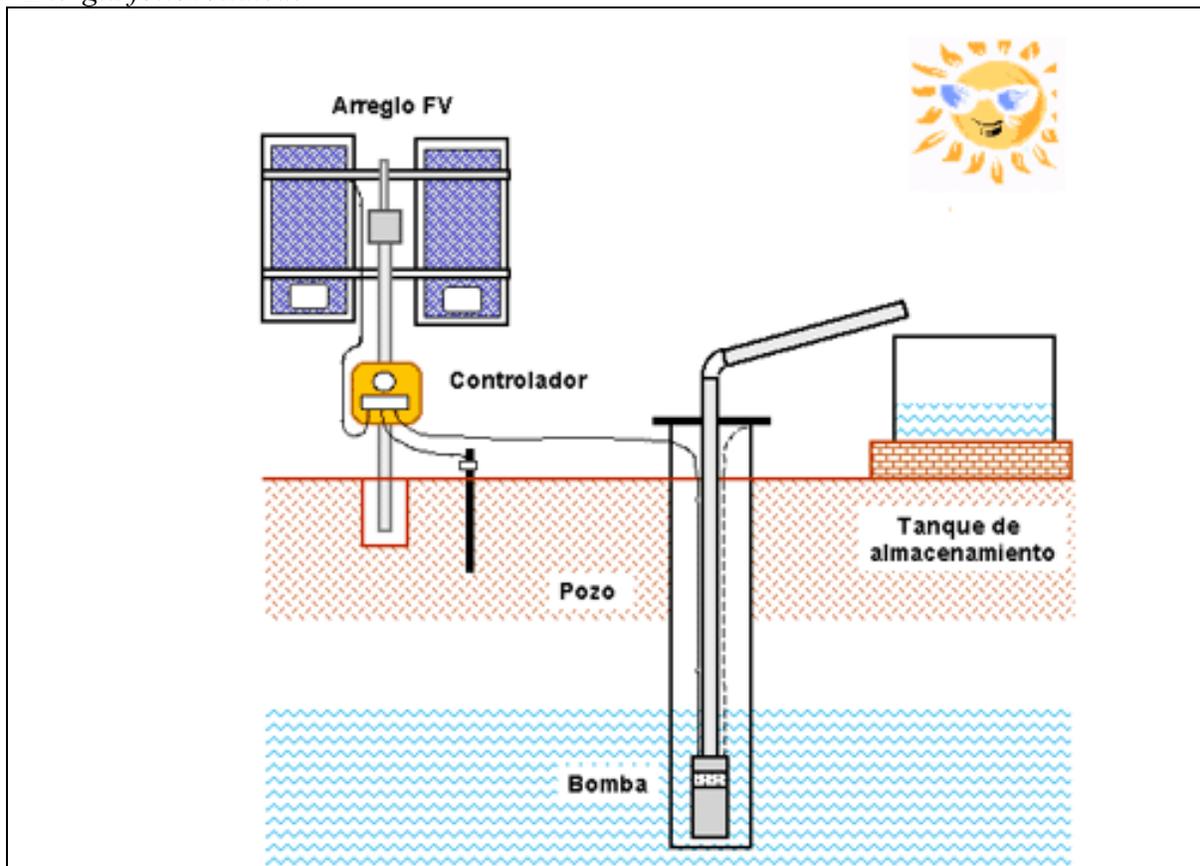


Figura 17. Esquema de una instalación típica de un sistema FV de bombeo de agua

Almacenamiento de energía

Debido a que Los sistemas FV sin almacenamiento no proveen agua cuando el sol no brilla, es recomendable contar con un tanque de almacenamiento. Se recomienda almacenar el agua para tres días de abasto.

Almacenar agua en tanques es mucho más económico que almacenar energía en baterías. Después de cinco años o menos, las baterías necesitan reemplazarse, mientras que la vida útil de un tanque de almacenamiento bien construido es de varias décadas. El almacenamiento por baterías normalmente se justifica sólo cuando el rendimiento máximo del pozo durante las horas de sol es insuficiente para satisfacer las necesidades diarias de agua y cuando se requiere bombear agua durante la noche. A largo plazo, podría ser más económico perforar otro pozo que añadir almacenamiento por baterías. La introducción de baterías en un sistema de bombeo FV podría reducir su confiabilidad e incrementar sus requerimientos de mantenimiento. En general no se recomienda utilizar baterías en sistemas de bombeo fotovoltaico.

Equipo de bombeo compatible con sistemas fotovoltaicos

Las bombas comunes disponibles en el mercado han sido desarrolladas pensando en que hay una fuente de potencia constante. Por otro lado, la potencia que producen los módulos FV es directamente proporcional a la disponibilidad de la radiación solar. Es decir, a medida que el sol cambia su posición durante el día, la potencia generada por los módulos varía y en consecuencia la potencia entregada a la bomba. Por esta razón se han diseñado algunas bombas especiales para la electricidad fotovoltaica las cuales se dividen, desde el punto de vista mecánico, en **centrífugas** y **volumétricas**.

Bombas centrífugas

Tienen un impulsor que por medio de la fuerza centrífuga de su alta velocidad arrastran agua por su eje y la expulsan radialmente. Estas bombas pueden ser sumergibles o de superficie y son capaces de bombear el agua a 60 metros de carga dinámica total, o más, dependiendo del número y tipo de impulsores. Están optimizadas para un rango estrecho de cargas dinámicas totales y la salida de agua se incrementa con su velocidad rotacional.

Las bombas de succión superficial (Figuras 18 y 19) se instalan a nivel del suelo y tienen la ventaja de que se les puede inspeccionar y dar servicio fácilmente. Tienen la limitante de que no trabajan adecuadamente si la profundidad de succión excede los 8 metros.



Figura 18. Bomba centrífuga superficial (SolarRam)

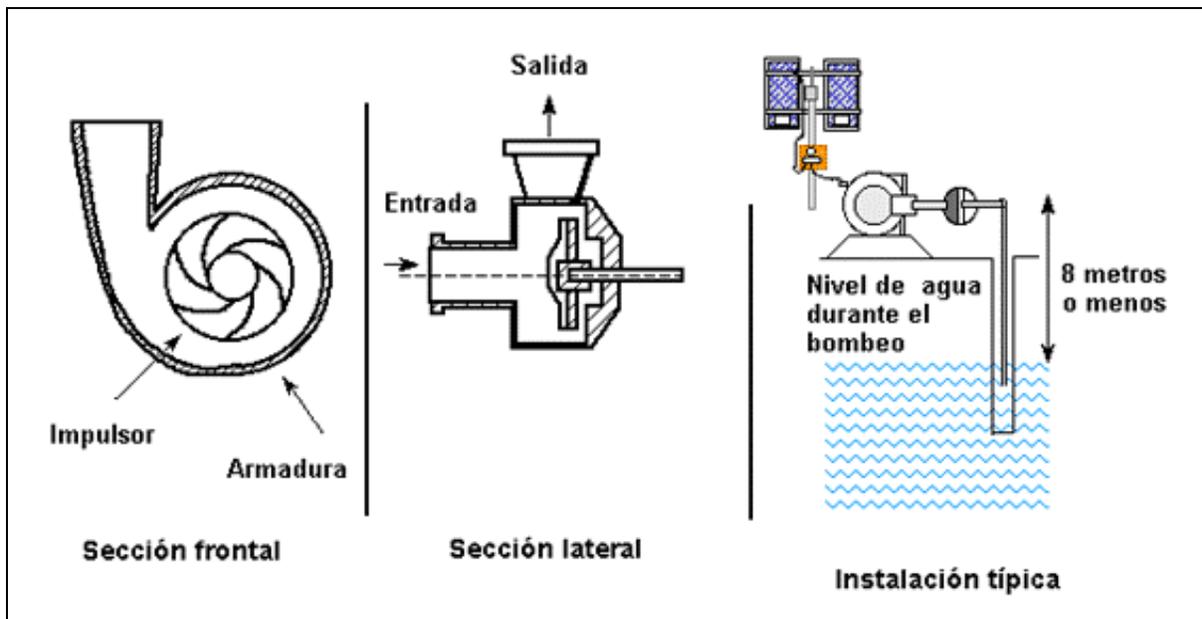


Figura 19. Esquema de una bomba centrífuga superficial

Hay una gran variedad de bombas centrífugas sumergibles. Algunas de estas bombas tienen el motor acoplado directamente a los impulsores y se sumergen completamente (Figuras 20, 21, y 22). Otras, tienen el motor en la superficie mientras que los impulsores se encuentran completamente sumergidos y unidos por una flecha. Generalmente las bombas centrífugas sumergibles tienen varios impulsores y por ello, se les conoce como bombas de paso múltiple o de etapas.

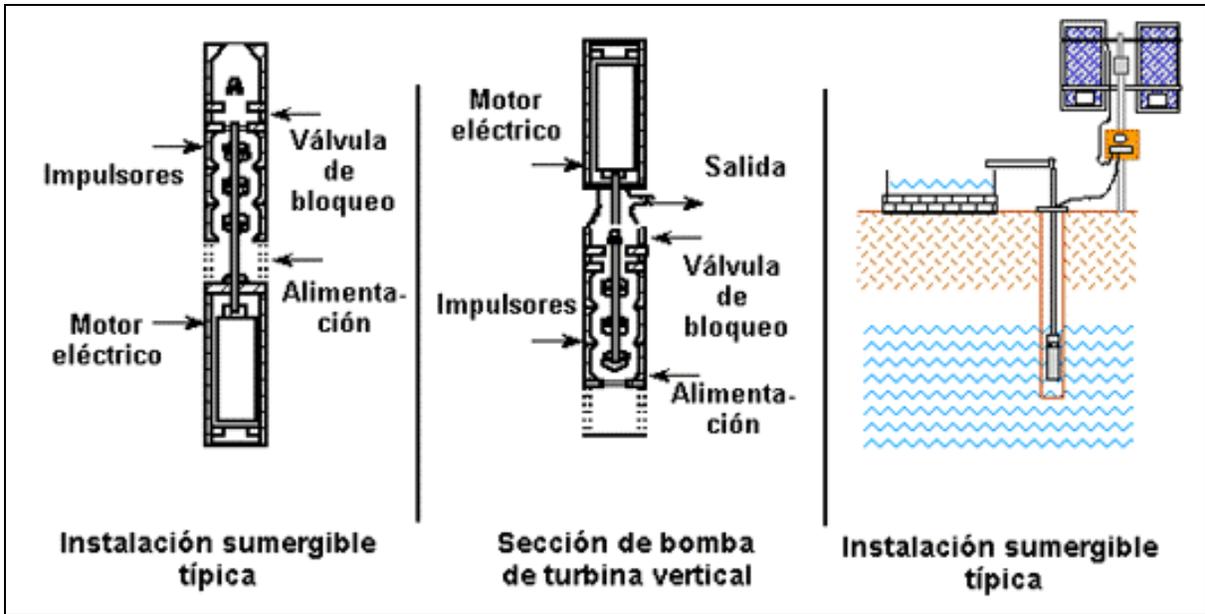


Figura 20. Esquema de una bomba centrífuga sumergible

Todas las bombas sumergibles están selladas y tiene el aceite de lubricación contenido para evitar contaminación del agua. Otras bombas utilizan el agua misma como lubricante. Estas bombas no deben operarse en seco porque sufren sobrecalentamiento y se queman.

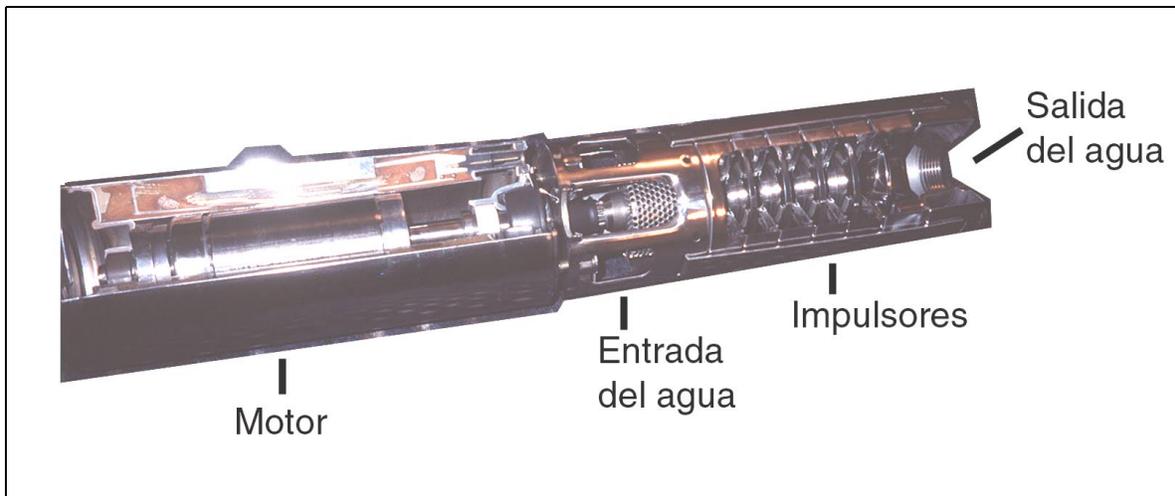


Figura 21. Vista interna de una bomba sumergible (Grundfos)



Figura 22. Bombas centrífugas sumergibles (SolarJack)

Bombas volumétricas

Las bombas volumétricas (Figura 23) o de desplazamiento positivo son adecuadas para el bombeo de bajos caudales y/o donde la profundidad es grande. Algunas de estas bombas usan un cilindro y un pistón para mover paquetes de agua a través de una cámara sellada. Otras utilizan un pistón con diafragmas. Cada ciclo mueve una pequeña cantidad de líquido hacia arriba. El caudal es proporcional al volumen de agua. Esto se traduce a un funcionamiento eficiente en un amplio intervalo de cargas dinámicas. Cuando la radiación solar aumenta también aumenta la velocidad del motor y por lo tanto el flujo de agua bombeada es mayor.

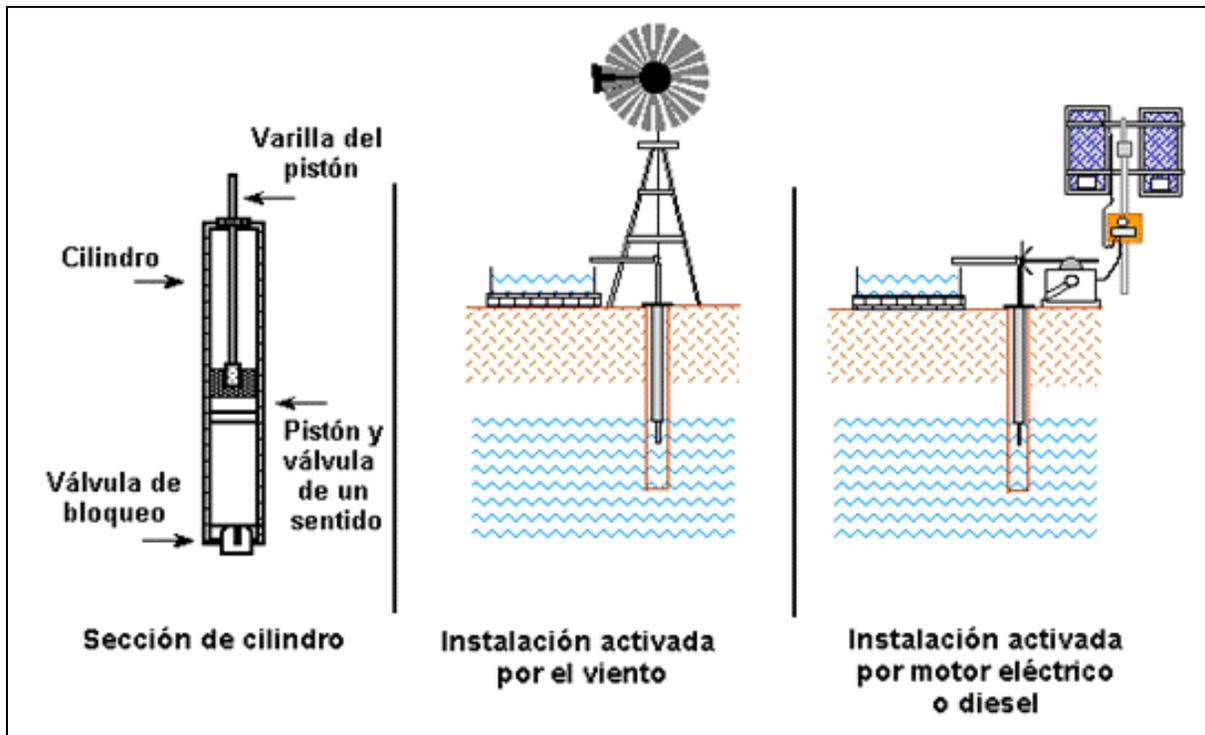


Figura 23. Esquema de una bomba volumétrica de cilindro

Bombas de cilindro: Las bombas de cilindro han sido muy populares en aplicaciones de bombeo mecánico activadas por el viento, tracción animal o humana. Su principio consiste en que cada vez que el pistón baja, el agua del pozo entra a su cavidad y cuando éste sube, empuja el agua a la superficie. La energía eléctrica requerida para hacerla funcionar se aplica sólo durante una parte del ciclo de bombeo. Las bombas de esta categoría deben estar siempre conectadas a un controlador de corriente para aprovechar al máximo la potencia del el arreglo fotovoltaico.

Bombas de diafragma: Estas bombas (Figuras 24 y 25) desplazan el agua por medio de diafragmas de un material flexible y resistente. Comúnmente los diafragmas se fabrican de caucho reforzado con materiales sintéticos. En la actualidad, estos materiales son muy resistentes y pueden durar de dos a tres años de funcionamiento continuo antes de requerir reemplazo, dependiendo de la calidad del agua. Los fabricantes de estas bombas proveen un juego de diafragmas para reemplazo que pueden adquirirse a un precio razonable. Existen modelos sumergibles y de superficie.

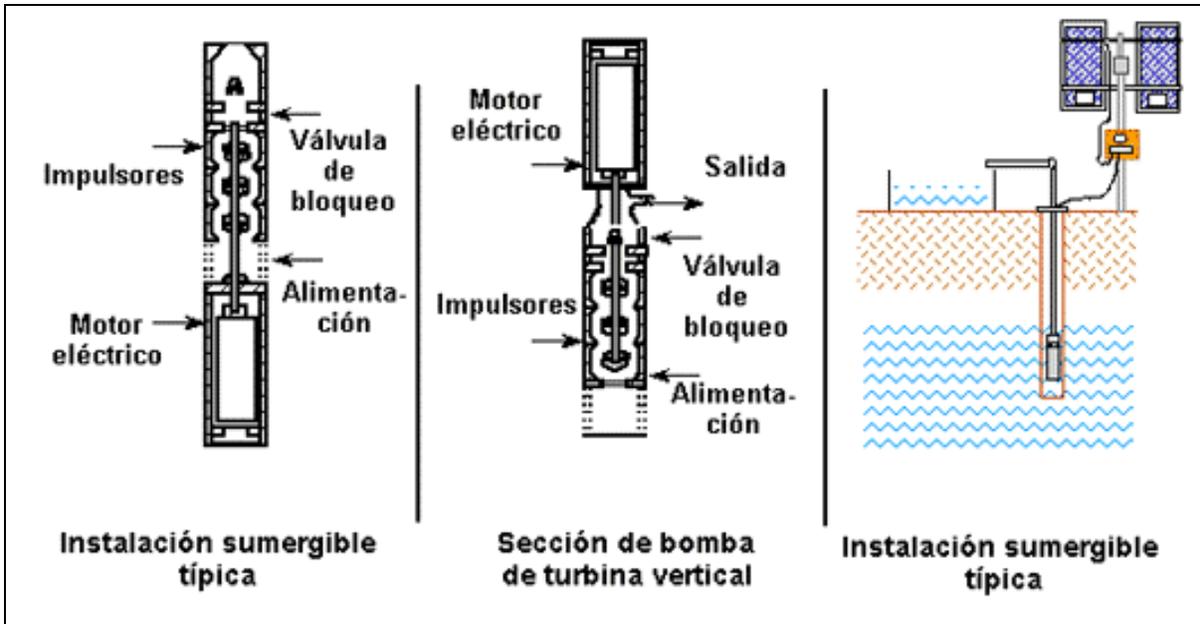


Figura 24. Esquema de una bomba de diafragma sumergible

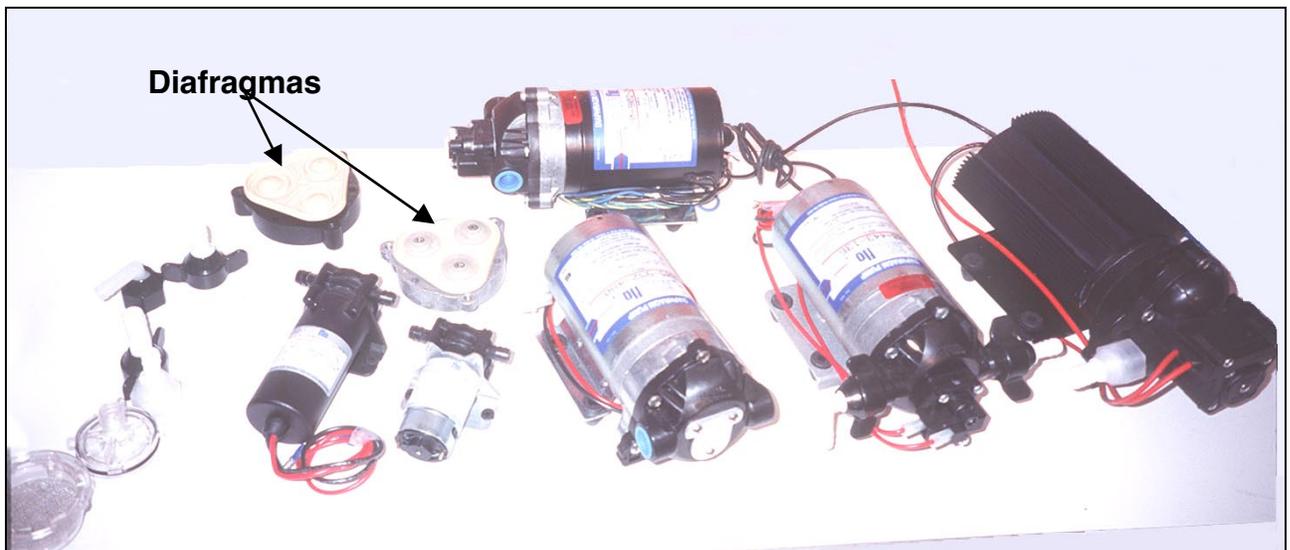


Figura 25. Bombas de diafragma superficiales(Shurflo)

Las bombas de diafragma son económicas. Cuando se instala una bomba de este tipo siempre se debe considerar el gasto que representa el reemplazo de los diafragmas una vez cada dos o tres años. Más aún, muchas de estas bombas tienen un motor de corriente continua con escobillas. Las escobillas también deben cambiarse periódicamente. Los juegos de reemplazo incluyen los diafragmas, escobillas, empaques y sellos. La vida útil de este tipo de bomba es aproximadamente 5 años del uso.

Selección de la bomba

Como se ha visto, las bombas centrífugas y volumétricas ofrecen diferentes alternativas para diferentes rangos de aplicación. El proceso de selección de la bomba para un proyecto es de suma importancia. Todas las bombas tienen que usar la energía eficientemente ya que en un sistema FV, la energía cuesta dinero. En general, el proyectista debe tener una idea clara de qué tipo de bomba es la más adecuada para su proyecto. Este proceso de selección de la bomba se complica debido a la multitud de marcas y características de cada bomba. Un sólo fabricante puede ofrecer más de 20 modelos de bombas y cada una tiene un rango óptimo de operación.

Las bombas más eficientes son las de desplazamiento positivo de pistón, pero no son recomendables para gastos medianos y grandes a baja carga dinámica total. Por ejemplo, una bomba de palanca puede llegar a tener una eficiencia de más del 40%, mientras que una bomba centrífuga puede tener una eficiencia tan baja como 15%. La Figura 26 indica el tipo de bomba adecuada que se recomienda en general según la carga dinámica total del sistema de bombeo. La Tabla 4 presenta las ventajas y desventajas de las diferentes bombas utilizadas en el bombeo FV.

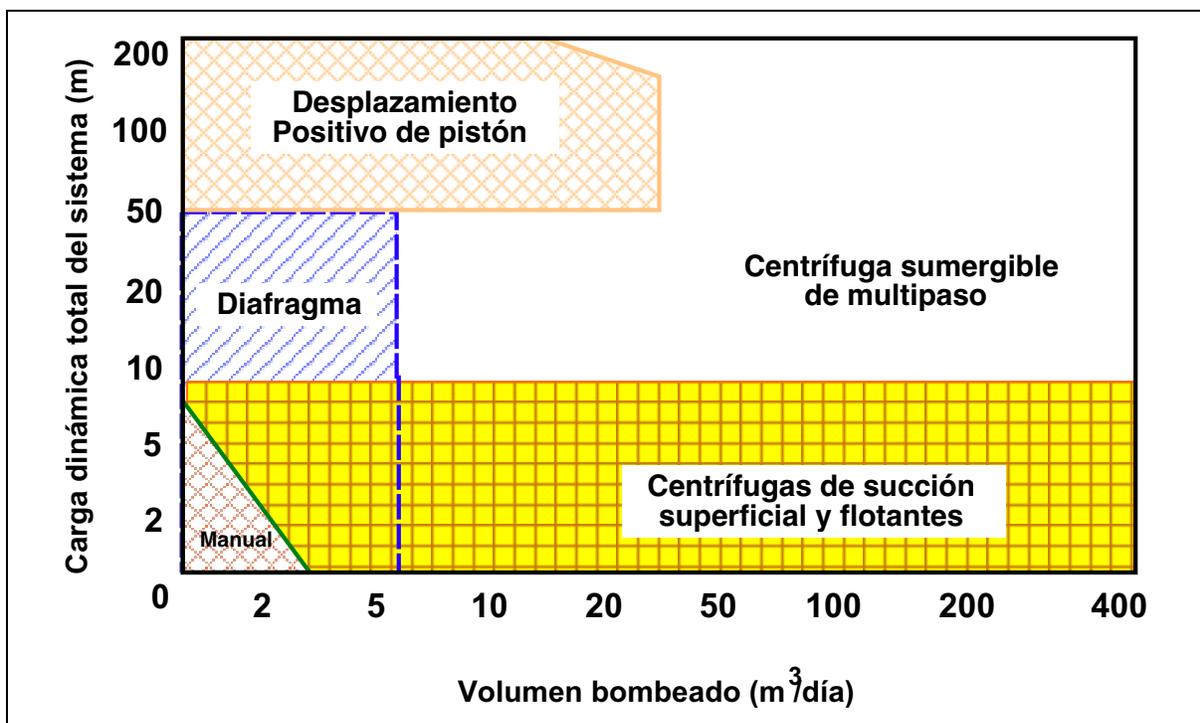


Figura 26. Intervalos comunes donde se aplica los diferentes tipos de bombas solares

Tabla 4. Principales características de las bombas fotovoltaicas

Bombas Fotovoltaicas	Características y Ventajas	Desventajas
Centrífugas sumergibles	Comúnmente disponibles. Pueden tolerar pequeñas cantidades de arena. Pueden utilizar el agua como lubricante. Cuentan con motores de CC de velocidad variable o CA. Manejan flujos altos. Operan a cargas dinámicas grandes. Tienen un diseño modular que permite obtener más agua al agregar más módulos fotovoltaicos.	Tienen un rango de eficiencia estrecho con respecto a la CDT. Se dañan si trabajan en seco. Deben extraerse para darles mantenimiento. Sufren desgaste acelerado cuando se instalan en fuentes corrosivas.
Centrífugas de succión superficial	Comúnmente disponibles. Pueden tolerar pequeñas cantidades de arena. Son de fácil operación y mantenimiento por ser superficiales. Cuentan con motores de CC de velocidad variable o CA. Manejan flujos altos. Manejan cargas dinámicas altas, aunque no son capaces de succionar más de 8 metros.	Tienen un rango de eficiencia estrecho con respecto a la CDT. Sufren desgaste acelerado cuando se instalan en fuentes corrosivas. Pueden dañarse por el congelamiento en climas fríos.
Desplazamiento positivo de pistón	Soportan cargas dinámicas muy grandes. La producción puede variarse ajustando la carrera del pistón.	Requieren de reemplazo regular de sellos del pistón. No toleran arenas o sedimentos. La eficiencia se reduce a medida que el pistón pierde la capacidad de sellar el cilindro. Debe extraerse el pistón y el cilindro del pozo para reparar los sellos. No dan grandes flujos.
Diafragma	Operan a cargas menores de 40 metros. Son muy económicas.	No toleran arenas o sedimentos. No trabajan a cargas dinámicas grandes Bajos flujos.

Tipos de motores

La selección de un motor depende de la eficiencia, disponibilidad, confiabilidad, acoplamiento a bombas y costos. Comúnmente se usan dos tipos de motores en aplicaciones FV: De CC (de imán permanente y de bobina) y de corriente alterna CA. Debido a que los arreglos FV proporcionan potencia en CC, los motores de CC pueden conectarse directamente, mientras que los motores de CA deben incorporar un inversor CC-CA. Los requerimientos de potencia en Watts pueden usarse como una guía general para la selección del motor. Los motores de CC de imán permanente, aunque requieren reemplazo periódico de las escobillas, son sencillos y eficientes para cargas pequeñas. Los motores de CC de campos bobinados (sin escobillas) se utilizan en aplicaciones de mayor capacidad y requieren de poco mantenimiento. Aunque son motores sin escobillas, el mecanismo electrónico que sustituye a las escobillas puede significar un gasto adicional y un riesgo de descompostura.

Los motores de CA son más adecuados para cargas grandes en el rango de diez o más caballos de fuerza. Los sistemas de CA son ligeramente menos eficientes que los sistemas CC debido a las pérdidas de conversión. Los motores de CA pueden funcionar por muchos años con menos mantenimiento que los motores CC.

Controladores

Los controles electrónicos pueden mejorar el rendimiento de un sistema de bombeo solar, bien diseñado, del 10 al 15%. Los controles se usan con frecuencia en áreas con niveles de

agua y/o condiciones atmosféricas fluctuantes. Los controles electrónicos consumen del 4 al 7% de la energía generada por el arreglo. Es común que las bombas FV se vendan junto con el controlador adecuado para operarlas eficientemente. Generalmente se usan controladores de potencia máxima (los cuales operan el arreglo cerca de su punto de potencia pico).

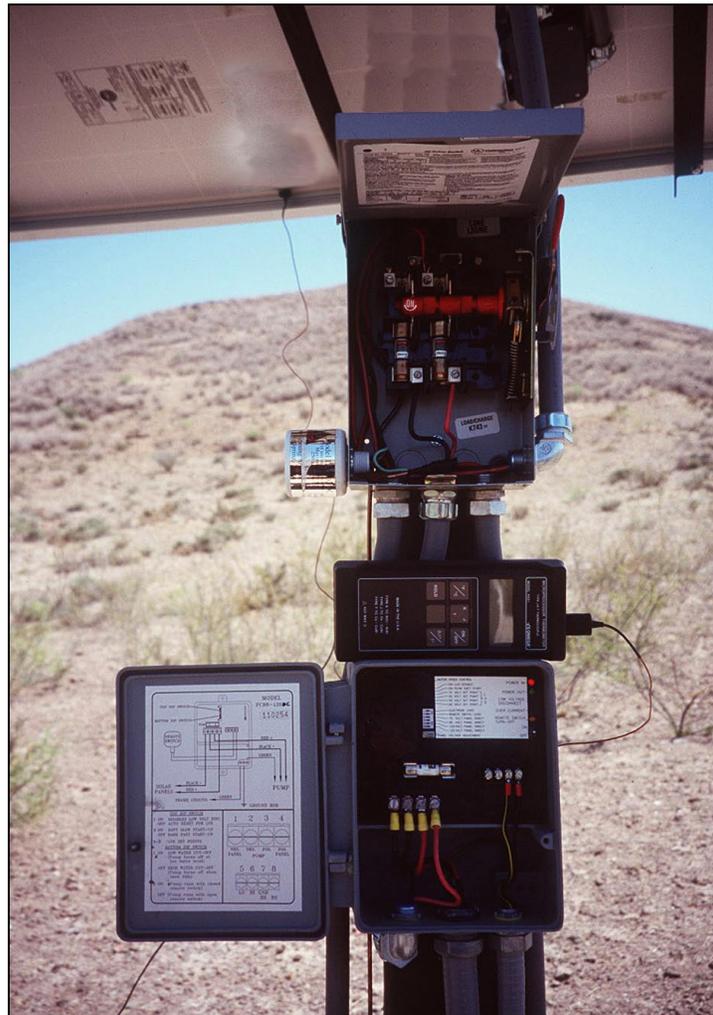


Figura 27. Controlador típico de un sistema fotovoltaico de bombeo (San Lorencito, Chihuahua)



Antes de iniciar el dimensionamiento de un sistema de bombeo activado con energía solar, es necesario contar con información básica que puede obtenerse directamente en el lugar de la obra. Se necesita conocer la demanda diaria de agua en el mes más crítico del año, llamado "mes de diseño," y las características físicas del pozo o la noria. La Figura 28 muestra estas características físicas.

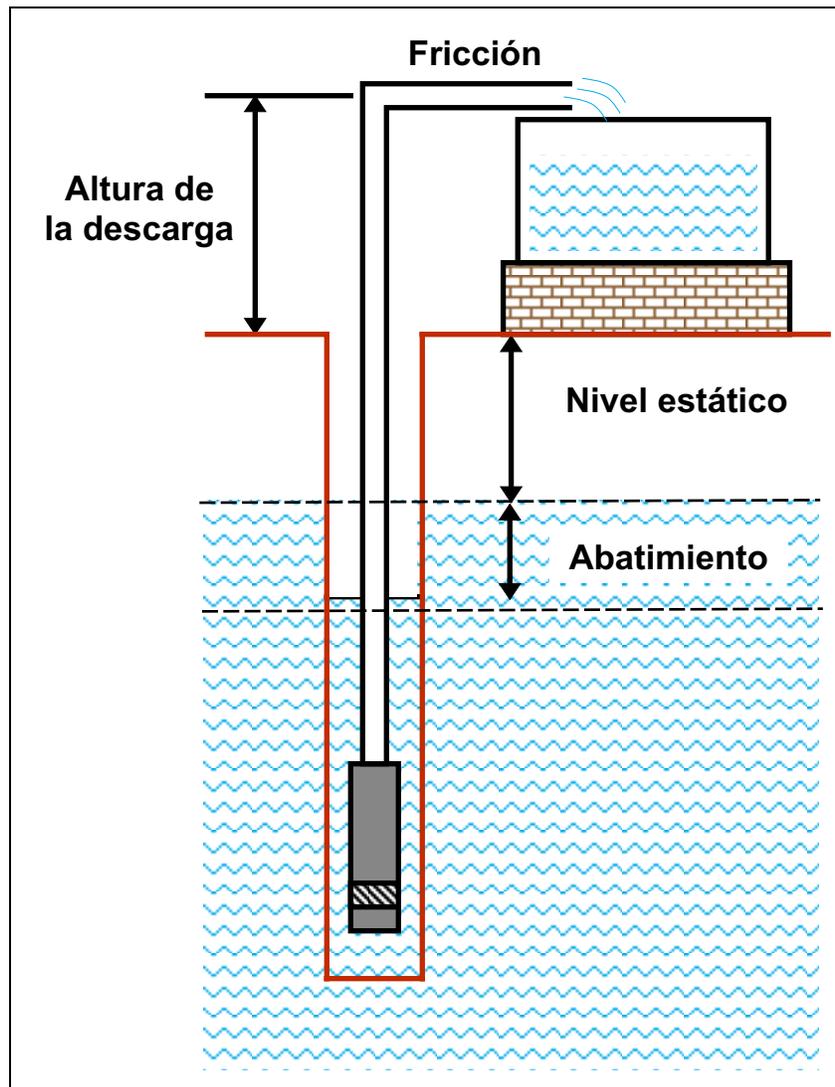
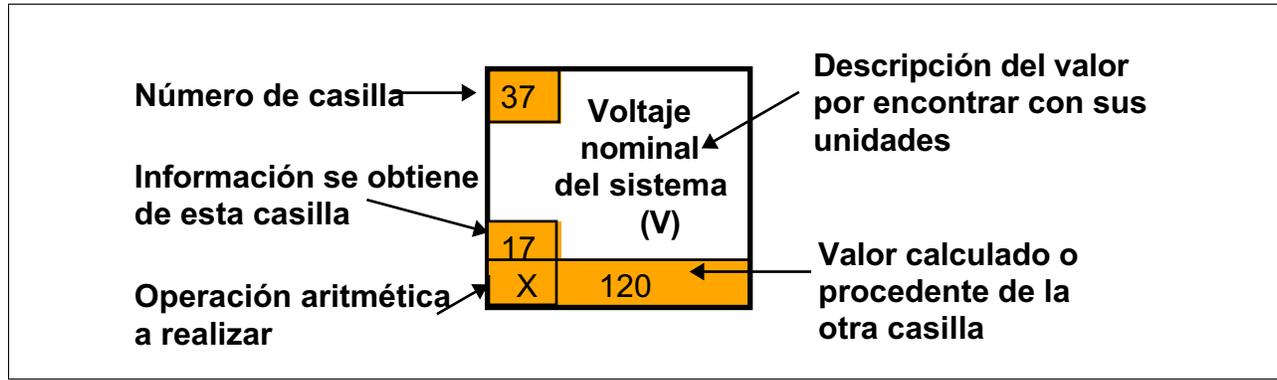


Figura 28. Características físicas de un pozo

Con los datos a la mano, las siguientes tres hojas de cálculo ayudarán a determinar el tamaño y configuración del arreglo fotovoltaico. Aunque este procedimiento puede ser diferente al

empleado por un profesional, servirá para asegurarse que una oferta técnica presentada por un vendedor sea factible.

Las siguientes tres hojas de cálculo contienen casillas que deben llenarse en el orden en que se presentan y tienen el siguiente formato:



Como ejemplo ilustrativo, se presenta el caso de "El Jeromín" al final de este capítulo. Los formularios pueden encontrarse en el Volumen 2, *Libro de Trabajo*. Cierta información deberá consultarse de tablas o materiales proporcionados por fabricantes.

Instrucciones para llenar las hojas de cálculo

Escriba el nombre y localización del proyecto en la sección de NOTAS DEL PROYECTO. Así mismo anote la fecha y el nombre del proyectista.

1. **Volumen de agua necesario (l/día):** Anote el requerimiento de agua diario para satisfacer la necesidad del usuario. Escoja el mes del año que requiera mayor el caudal de bombeo. Tabla 5 ayuda en la selección del mes. Anote la demanda diaria y divídala entre la insolación en horas Solares pico para obtener el caudal. Los valores de insolación podrán encontrarse en el Apéndice. Utilice datos del lugar geográfico más cercano al sitio del proyecto.

Tabla 5. Cálculo del mes crítico

Mes	Demanda Diaria (l/día)		Insolación (h-pico/día)		Caudal (l/h)
enero	8,000	÷	5.8	=	1,379
febrero	8,000	÷	6.4	=	1,250
marzo	10,000	÷	6.8	=	1,471
abril	10,000	÷	6.9	=	1,449
mayo	10,000	÷	6.9	=	1,449
junio*	12,500	÷	6.4	=	1,953
julio*	12,500	÷	6.4	=	1,953
agosto	12,500	÷	6.5	=	1,923
septiembre	12,500	÷	6.8	=	1,838
octubre	10,000	÷	6.8	=	1,471
noviembre	10,000	÷	6.0	=	1,667
diciembre	8,000	÷	5.2	=	1,538

*mes crítico

2. **Insolación del sitio (kWh/día):** De la tabla anterior, anote el valor de insolación en horas pico por día correspondiente al mes crítico de bombeo.
3. **Régimen de bombeo (l/h):** Calcule este valor con la información anterior. Este valor no debe sobrepasar la capacidad de recarga del pozo. Si este es el caso, considere reducir la demanda diaria.
4. **Nivel estático (m):** La distancia vertical medida desde el nivel del suelo hasta el espejo del agua cuando no hay una bomba operando.
5. **Abatimiento (m):** La distancia vertical medida desde el nivel estático al nivel del agua cuando opera una bomba. Con frecuencia este valor se obtiene de pruebas realizadas durante un aforo.
6. **Altura de descarga (m):** Distancia vertical medida desde el nivel del suelo hasta el punto donde el agua es descargada.
7. **Carga estática (m):** Calcule la distancia vertical del recorrido del agua desde el nivel más bajo hasta la altura de descarga a partir de las casillas 4, 5 y 6.
8. **Recorrido adicional de tubería (m):** Este es el resto de la tubería no incluida en el cálculo de carga estática. Tome en cuenta la distancia vertical desde el abatimiento hasta la posición de la bomba, así como las distancias horizontales del recorrido de la tubería.
9. **Recorrido total de tubería (m):** Es la longitud total de las tuberías por donde pasa el agua. Calcule este valor a partir de las casillas 7 y 8.
10. **Factor de fricción (decimal):** Esta es la presión causada por la fricción del agua al pasar por las tuberías. Puede calcularse de varias maneras como se explica en esta guía. Si no cuenta con suficiente información, utilice el valor por omisión de 2% del largo de la tubería, expresado como 0.02 en esta casilla.
11. **Carga por fricción (m):** Calcule a partir de las casillas 9 y 10. Es una compensación de las pérdidas por fricción causadas por el paso del agua por la tubería rugosa.
12. **Carga estática (m):** Anote el mismo valor obtenido en la casilla 7.
13. **Carga dinámica total (m):** Calcule esta carga expresada en metros a partir de las casillas 11 y 12. Es la suma de la carga causada por la fricción y la carga estática.

Con la información obtenida hasta la casilla 13, es posible seleccionar la bomba adecuada. Consulte la literatura proporcionada por el (los) fabricante(s). Llene las casillas contenidas en el bloque "*Información de la bomba y motor*" y continúe en la casilla 14.

14. **Volumen de agua necesario (l/día):** Anote el valor de la casilla 1.
15. **Carga dinámica total (m):** Anote el valor obtenido en la casilla 13.
16. **Factor de conversión:** El factor 367 l-m/Wh se usa para calcular la energía en (watts – hora) necesaria para levantar un litro de agua una distancia de un metro. Este valor es una constante física.
17. **Energía hidráulica (Wh/día):** Calcule la energía necesaria para elevar el agua a partir de las casillas 14, 15 y 16.
18. **Eficiencia de la bomba (decimal):** Es la proporción de energía eléctrica transformada a energía hidráulica. Los rendimientos diarios varían con la altura dinámica total, la insolación solar y el tipo de bomba. Busque esta información en publicaciones del fabricante. Si no dispone de esta información, use los valores por omisión presentados a continuación.

Tabla 6. Valores por omisión de eficiencias de sistemas de bombeo

Carga dinámica total (metros)	Tipo de sistema de bombeo	Eficiencia (%)
5	Centrífuga de superficie	25
20	Centrífuga de superficie	15
20	Centrífuga sumergible	25
20 a 100	Centrífuga de paso múltiple	35
50 a 100	Desplazamiento positivo	35
más de 100	Desplazamiento positivo (de palanca)	45

19. **Energía del arreglo FV (Wh/día):** Calcule la energía necesaria para la operación de este sistema a partir de las casillas 17 y 18.
20. **Voltaje nominal del sistema (V):** Anote el voltaje a que debe funcionar el sistema durante el día. Este es el voltaje de admisión en el controlador o inversor.
21. **Carga eléctrica (Ah/día):** Calcule la producción del arreglo fotovoltaico expresado en Ampere-horas / día a partir de las casillas 19 y 20.
22. **Carga eléctrica (Ah/día):** Anote el valor de la casilla 21.
23. **Factor de rendimiento del conductor (decimal):** Los conductores eléctricos bien seleccionados tienen una eficiencia aproximada de 95% en los sistemas de bombeo solar.
24. **Carga eléctrica corregida (Ah/día):** Carga eléctrica requerida después de considerar las pérdidas consideradas en la casilla anterior para satisfacer la carga diaria.
25. **Insolación (kWh/m²-día):** Anote el valor de la casilla 2.
26. **Corriente del proyecto (A):** Calcule la corriente necesaria para satisfacer la carga del sistema del mes de diseño a partir de las casillas 25 y 25.
27. **Corriente del proyecto (A):** Anote el valor de la casilla 26.
28. **Factor de reducción del módulo (decimal):** Los módulos fotovoltaicos pierden eficiencia debido a las condiciones de trabajo en el campo. Esto se debe del efecto de temperatura, degradación con el tiempo, polvo en la superficie, cargas desiguales y algunas condiciones más. Suponga un 95% de eficiencia en módulos cristalinos y 70% en módulos amorfos.
29. **Corriente ajustada del proyecto (A):** Calcule la corriente mínima del arreglo necesaria para activar el sistema de bombeo a partir de las dos casillas anteriores.

Seleccione un módulo fotovoltaico y anote sus características físicas en las casillas del bloque "*Información del módulo fotovoltaico*" Continúe en la casilla 30.

30. **Corriente Imp del módulo (A):** Anote la corriente a máxima potencia Imp proporcionada por el fabricante del módulo fotovoltaico. NOTA: Seleccione un módulo fotovoltaico y anote las especificaciones en las casillas contenidas en *Información del Módulo Fotovoltaico*.
31. **Módulos en paralelo:** Este cálculo proporciona el número de módulos que irán conectados en paralelo. Muy importante: Si el valor encontrado no es un número entero, anote el **número entero inmediatamente mayor**. Otra opción es buscar un módulo con diferente Imp y repetir el proceso desde la casilla 30.
32. **Voltaje nominal del sistema (V):** Anote el valor de la casilla 20.
33. **Voltaje Vmp del módulo (V):** Encuentre el voltaje de máxima potencia Vmp del módulo de la información proporcionada por el fabricante.

34. **Módulos en serie:** Calcule el número de módulos conectados en serie necesarios para producir la tensión del sistema. Muy importante: Si el valor encontrado no es un número entero, anote el **número entero inmediatamente superior**.
35. **Módulos en paralelo:** Anote el valor de la casilla 31.
36. **Total de módulos:** Calcule el número total de módulos en el arreglo. Es el producto del número de módulos en paralelo por el número de módulos en serie. Asegúrese de que sea un entero múltiplo del número de módulos en paralelo.
37. **Corriente Imp del módulo (A):** Anote el valor la casilla 30.
38. **Voltaje Vmp del módulo (A):** Anote el valor de la casilla 33.
39. **Tamaño del arreglo fotovoltaico (W):** Calcule la potencia del arreglo fotovoltaico a partir de las tres casillas anteriores.
40. **Módulos en paralelo:** Anote el valor de la casilla 31.
41. **Corriente Imp del módulo (A):** Anote el valor de la casilla 30.
42. **Voltaje nominal del sistema (V):** Anote el valor de la casilla 20.
43. **Factor de rendimiento del sistema (decimal):** Anote el valor de la casilla 18.
44. **Factor de conversión:** Mismo valor de la casilla 16.
45. **Insolación del sitio (horas-pico/día):** Anote el valor de la casilla 2.
46. **Factor de reducción del módulo (decimal):** Anote el número en la casilla 28.
47. **Carga dinámica total (m):** Anote el número de la casilla 13.
48. **Agua Bombeada (l/día):** Esta es la cantidad de litros de agua bombeada en un día con este diseño. Calcule a partir de los valores de las casillas 40 hasta la 47.
49. **Agua Bombeada (l/día):** Anote el valor de la casilla anterior.
50. **Insolación del sitio (horas-pico/día):** Anote el valor de la casilla 2.
51. **Régimen de bombeo (l/h):** Calcule el régimen de bombeo de agua y compárelo con la capacidad de la fuente de agua y con el valor obtenido en las tablas de determinación del mes crítico de bombeo.

Proyecto **Rancho Pulgas Blancas** Contacto **Don Chón Prieto. Propietario**
 Persona a cargo **Ing. Juan Camaney** Fecha **Agosto 15, 1999**

**HOJA DE CALCULOS 1
BOMBEO DE AGUA**

CALCULO DE LA CARGA DEL BOMBEO DE AGUA.

Los textos y valores en rojo pueden cambiarse. Las casillas de color verde son necesarias para realizar todos los cálculos. El volumen de agua es en litros. Las cargas se dan en metros. Un mensaje de advertencia aparecerá si se ingresan valores incorrectos.

1	Volumen de agua necesaria por día (l/día)	2	Insolación del sitio (h-pico/día)	3	Régimen de bombeo (l/h)
	12,500	/	6.4	=	1953

4	Nivel estático (m)	5	Abatimiento (m)	6	Altura de descarga (m)	7	Carga estática (m)	8	Recorrido adicional de tubería (m)	9	Recorrido total de tubería (m)	10	Factor de fricción (decimal)	11	Carga por fricción (m)	12	Carga estática (m)	13	Carga dinámica total (m)
	29	+	4	+	9.3	=	42.3	+	1.8	=	44.1	X	0.02	=	0.882	+	42.3	=	43.18

Ahora es posible seleccionar una bomba de agua de acuerdo a las necesidades y especificaciones del fabricante. Consulte la información técnica proporcionada por el fabricante de bombas de agua y llene las casillas de la derecha antes de continuar en la casilla 11.

INFORMACION DE LA BOMBA Y MOTOR

Marca	Grundfos
Modelo	SP3A-10
Tipo de bomba	Centr. Sumergible
Tipo de motor	Trifásico
Voltaje de operación (c.a/c.c.)	120
Eficiencia de la bomba	0.35

14	Volumen de agua necesario por día (l/día)	15	Carga dinámica total (m)	16	Factor conversión	17	Energía Hidráulica (Wh/día)	18	Eficiencia de la bomba (decimal)	19	Energía del arreglo FV (Wh/día)	20	Voltaje nominal del sistema (V)	21	Carga eléctrica (Ah/día)
1	12,500	X	43.18	/	367	=	1470.78	/	0.35	=	4202.22	/	120	=	35.02

22	Carga eléctrica (Ah/día)	23	Factor de rendimiento del conductor (decimal)	24	Carga eléctrica corregida (Ah/día)	25	Insolación del sitio (h-pico/día)	26	Corriente del proyecto (A)
21	35.02	/	0.95	=	36.86	/	6.4	=	5.76

Notas del Proyecto: Granja familiar "El Jeromin," municipio de Aldama
 Mes de diseño: Julio Realizó: Ing. Juan Camaney
 Enero de 1999 Grupo de Trabajo, Chihuahua

**HOJA DE CALCULOS 2
BOMBEO DE AGUA**

DIMENSIONAMIENTO DEL ARREGLO FOTOVOLTAICO

Ahora es el momento de seleccionar el modelo de módulo fotovoltaico que se usará en el arreglo.
Repita este proceso hasta encontrar el menor número posible de módulos que satisfagan las necesidades del sistema de bombeo.

INFORMACION DEL MODULO FOTOVOLTAICO	
Marca y modelo Solarex VLX-53	
Tipo Policristalino	
Vmp	Voc
17.2	21.3
Imp	Isc
3.08	3.4

27	Corriente del Proyecto (A)	28	Factor de reducción del módulo (decimal)	29	Corriente ajustada del proyecto (A)	30	Corriente Imp del módulo (A)	31	Módulos en paralelo (núm. entero)
26	5.76	/	0.95	=	6.06	/	3.08	=	2

32	Voltaje nominal del sistema (V)	33	Voltaje Vmp del módulo (V)	34	Módulos en serie	35	Módulos en paralelo	36	Total de Módulos	37	Corriente Imp del módulo (A)	38	Voltaje Vmp del módulo (V)	39	Tamaño del arreglo fotovoltaico (W)
20	120	/	17.2	=	7	X	2	=	14	X	3.08	X	17.2	=	742

**HOJA DE CALCULOS 3
BOMBEO DE AGUA**

AGUA BOMBEADA Y REGIMEN DE BOMBEO.

40	Módulos en paralelo	41	Corriente Imp del módulo (A)	42	Voltaje Nominal del sistema (V)	43	Factor de rendimiento del sistema (decimal)	44	Factor de conversión	45	Insolación del sitio (h-pico/día)	46	Factor de reducción del módulo (decimal)	47	Carga dinámica total (m)	48	Agua Bombeada (l/día)
31	2	X	3.08	X	120	X	0.35	X	367	X	6.4	X	0.95	/	43.18	=	13,369

Compare el régimen de bombeo (l/h) de la casilla 51 con la capacidad de la fuente de agua. Si el régimen de bombeo es mayor que la capacidad de batería o bien amplíe la fuente de agua. Esta es una decisión que se basa en el aspecto económico.

49	Agua Bombeada (l/día)	50	Insolación del sitio (h-pico/día)	51	Régimen de bombeo (l/h)
48	13,369	/	6.4	=	2,089

El ejemplo ilustrativo muestra que el arreglo necesario consta de 14 módulos de 53 Watts-pico, conectados 2 en paralelo por 7 en serie, dando una potencia nominal de 742 Watts-pico. En el dimensionamiento pudo seleccionarse otro módulo o bomba. Al final, se instaló un arreglo de 848 Wp en el Jeromín (8s x 1p).

Después de llenar la casilla 10, se encontró que la carga dinámica total se aproximaba a los 40 metros. Esta información se utilizó para seleccionar la bomba. Todos los fabricantes publican tablas y gráficas que ayudan en la selección de la bomba adecuada. Algunos de ellos incluyen recomendaciones del tamaño aproximado del arreglo fotovoltaico necesario. Debe tomarse en cuenta que los fabricantes pueden utilizar unidades diferentes. En la Tabla 7 se muestra el cuadro de selección que publica el fabricante de la bomba que se utilizó en El Jeromín. Esta tabla muestra que para 40 m de carga dinámica total y para un flujo de 12,500 litros por día el modelo de la bomba recomendada es SP3A-10.

Además, el mismo fabricante publica unas gráficas de rendimiento que relaciona el volumen de agua diario, la carga dinámica total, la insolación y el tamaño del arreglo fotovoltaico. Estas gráficas, conocidas como *curvas de rendimiento*, son de utilidad para comprobar el dimensionamiento realizado con las hojas de cálculo. Las curvas de rendimiento de la bomba instalada en "El Jeromín" (SP3A-10) se incluye como referencia en la Figura 29.

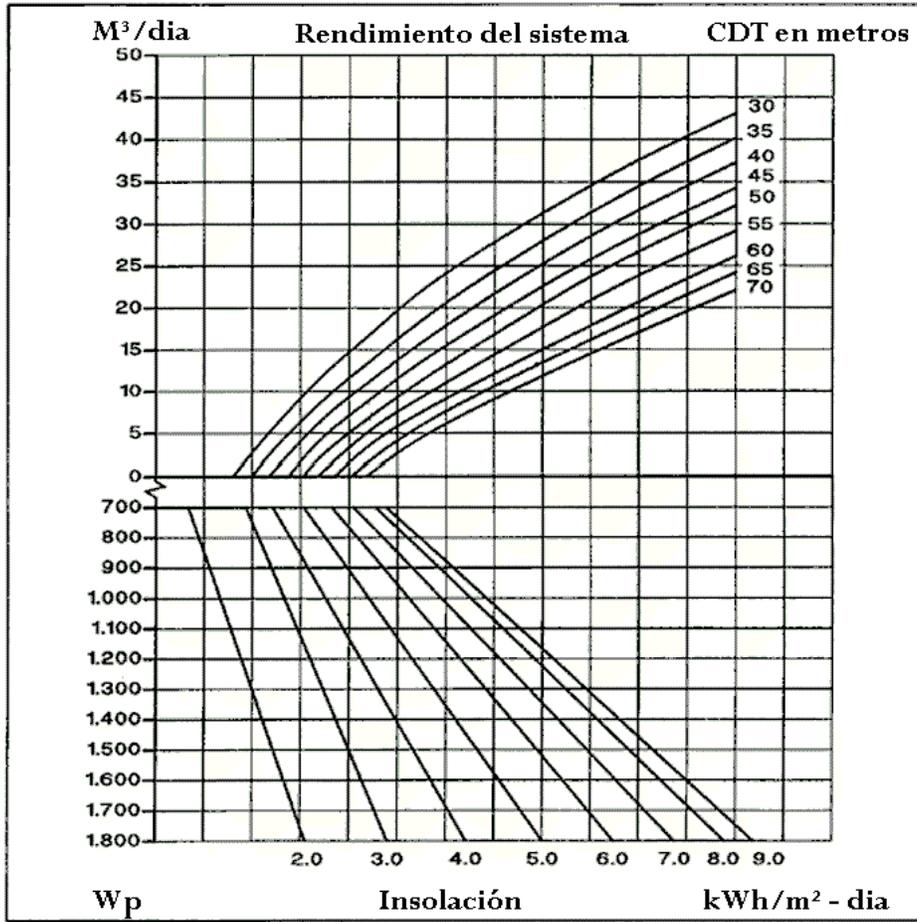


Figura 29. Curva de rendimiento (ejemplo para Grundfos SP 3A-10)

Tabla 1. Cuadro de selección de bomba de un fabricante*

Altura	420 W	448 W	480 W	512 W	840 W	896 W	960 W	1024W	1440W	1536W	1680W	1920W
5M	8A-5	8A-5	8A-5	8A-5	14A-3	14A-3	14A-3	14A-3	14A-3	14A-3	14A-3	14A-3
Invierno M ³ /Día	22	26	28	31	72	75	85	90	115	120	128	135
Verano M ³ /Día	42	46	51	58	109	110	119	125	150	155	165	170
Fujo Max. L/M	110	121	152	163	250	260	270	284	320	334	351	371
10M	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	8A-5	8A-5	8A-5	8A-5	14A-3	14A-3	14A-3	14A-3
Invierno M ³ /Día	12	13	15	17	35	38	41	45	70	75	85	90
Verano M ³ /Día	24	27	29	32	61	65	69	75	109	115	125	130
Fujo Max. L/M	64	102	112	122	230	247	261	284	413	436	474	493
15M	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	8A-5	8A-5	8A-5	8A-5
Invierno M ³ /Día	10	11	12	14	27	29	31	33	48	52	57	65
Verano M ³ /Día	19	22	24	26	44	48	52	57	82	87	94	111
Fujo Max. L/M	53	82	90	100	169	182	197	215	309	332	356	422
20M	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	8A-5	8A-5
Invierno M ³ /Día	5	6	7	8	20	22	24	26	38	40	43	51
Verano M ³ /Día	12	14	15	17	36	39	42	45	63	69	75	86
Fujo Max. L/M	36	52	58	66	136	148	157	169	239	260	284	326
25M	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7
Invierno M ³ /Día	2	3	4	5	15	17	19	21	32	34	37	42
Verano M ³ /Día	7	9	11	12	29	32	34	38	53	57	61	70
Fujo Max. L/M	25.393	34.285	39.8796	46.9088	109.741	120.93	130.541	142.304	201.98	215.895	231.531	265.96
30M	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	5A-7	5A-7	5A-7	5A-7
Invierno M ³ /Día	2	2	3	4	11	13	14	15	24	27	30	35
Verano M ³ /Día	6	7	9	10	21	23	25	28	43	46	50	58
Fujo Max. L/M	21	28	33	38	80	87	95	106	163	176	191	218
40M	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	5A-7
Invierno M ³ /Día	0	0	0	2	8	9	10	11	18	20	22	26
Verano M ³ /Día	3	4	5	6	16	18	19	21	32	35	39	45
Fujo Max. L/M	12	15	18	22	61	68	74	81	120	133	147	171
50M	2A-15	2A-15	2A-15	2A-15	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10
Invierno M ³ /Día	0	0	0	0	5	6	7	8	14	16	18	21
Verano M ³ /Día	1	2	3	4	11	12	14	16	26	28	30	34
Fujo Max. L/M	7	8	11	13	42	46	53	60	97	106	115	131
60M			2A-15	2A-15	2A-15	2A-15	2A-15	2A-15	3A-10	3A-10	3A-10	3A-10
Invierno M ³ /Día			0	0	4	4	5	6	9	11	12	15
Verano M ³ /Día			1	2	8	9	10	11	19	21	23	27
Fujo Max. L/M			5	8	31	35	38	43	71	79	88	103
70M					2A-15	2A-15	2A-15	2A-15	2A-15	2A-15	2A-15	3A-10
Invierno M ³ /Día					2	2	3	4	8	9	10	12
Verano M ³ /Día					6	7	8	9	15	17	19	23
Fujo Max. L/M					22	26	30	34	57	65	74	89
80M					1.5A-21	1.5A-21	1.5A-21	1.5A-21	2A-15	2A-15	2A-15	2A-15
Invierno M ³ /Día					2	0	3	3	6	7	8	10
Verano M ³ /Día					5	4	6	7	12	14	15	18
Fujo Max. L/M					19	15	24	27	46	52	58	69
90M					1.5A-21	1.5A-21	1.5A-21	1.5A-21	2A-15	2A-15	2A-15	2A-15
Invierno M ³ /Día					0	0	2	2	5	6	7	8
Verano M ³ /Día					3	3	5	5	10	12	13	16
Fujo Max. L/M					12	11	17	20	39	44	50	60
100M					1.5A-21	1.5A-21	1.5A-21	1.5A-21	2A-15	2A-15	2A-15	2A-15
Invierno M ³ /Día					0	0	0	1	4	5	6	7
Verano M ³ /Día					2	2	4	4	9	10	13	14
Fujo Max. L/M					9	6	13	16	35	39	49	53
120M							1.5A-21	1.5A-21	1.5A-21	1.5A-21	1.5A-21	2A-15
Invierno M ³ /Día							0	0	3	3	4	5
Verano M ³ /Día							2	3	6	8	9	11
Fujo Max. L/M							8	11	24	29	34	42
200M												1A-28
Invierno M ³ /Día												1
Verano M ³ /Día												3
Fujo Max. L/M												11

*Cortesía Grundfo



La decisión de utilizar un sistema solar para bombeo de agua depende en gran medida del costo del sistema y de los beneficios económicos que se esperan. Los sistemas de bombeo FV tienen un alto costo inicial comparado con otras alternativas de bombeo; sin embargo, no necesitan combustible y requieren menos mantenimiento y atención del operador. Debido a esta característica de los sistemas solares, el costo a largo plazo debe usarse para determinar si el sistema solar es económicamente viable. En este capítulo se muestra cómo estimar el costo inicial de un sistema de bombeo a partir de las características del proyecto propuesto. También se muestra un método para determinar el costo a largo plazo del sistema solar comparado con otras alternativas de bombeo, tomando en cuenta gastos de reemplazos de equipo, combustible operación y mantenimiento (OyM).

Estimación del costo del sistema

La mejor manera de estimar el costo de un sistema de bombeo solar es obtener cotizaciones de uno o más proveedores locales. Sin embargo, el costo se puede estimar con la ayuda de datos sobre sistemas instalados recientemente. El lector debe tomar en cuenta que el costo total de un sistema instalado incluye lo siguiente:

- Costo de materiales con todos los impuestos aplicables
- Costo de instalación, garantías y acuerdo de mantenimiento
- Margen de ganancia de la empresa

El costo de instalación, garantía y mantenimiento varían mucho de acuerdo al proveedor y el acceso al lugar del proyecto. Sin embargo, es raro que estos costos excedan el 30% del costo total del sistema.

Tabla de costos aproximados

Una estimación del costo se puede obtener a partir de la demanda de agua, la carga dinámica total y el recurso solar del lugar. El Apéndice contiene una *Tabla D-1 de Costos Aproximados Para Sistemas de Bombeo Fotovoltaico en México*. La tabla proporciona costos aproximados de materiales en México incluyendo impuestos aplicables e instalación, aunque no incluye pólizas de garantías. La tabla se utiliza como se muestra a continuación:

- Seleccionar la columna correspondiente a la insolación (en horas solares pico) en el mes crítico del año.
- Desplazarse hacia abajo y seleccionar el volumen de agua requerido (en m³ por día).
- Desplazarse hacia la derecha y seleccionar el costo del sistema que

corresponde a la carga dinámica total del proyecto (en metros).

Ejemplo 4

Para el rancho El Jeromín, en Chihuahua, se requiere un sistema solar para bombear 12.5 m³ en el verano (6 horas solare pico) de agua a una carga dinámica total de 40 m. El costo aproximado obtenido de la tabla D-1 es US \$11,600.

Datos históricos de sistemas instalados en México

Otra manera sencilla de estimar el costo total del sistema es revisar datos de costos de sistemas similares instalados recientemente. En la siguiente grafica se muestran costos de sistemas instalados en México entre 1994 y 1998, a través del Programa de Cooperación en Energía Renovable. El costo del sistema está relacionado con el ciclo hidráulico del proyecto. Las cifras de costo representan el costo final del sistema instalado. La variabilidad del costo total se debe principalmente al costo de instalación.

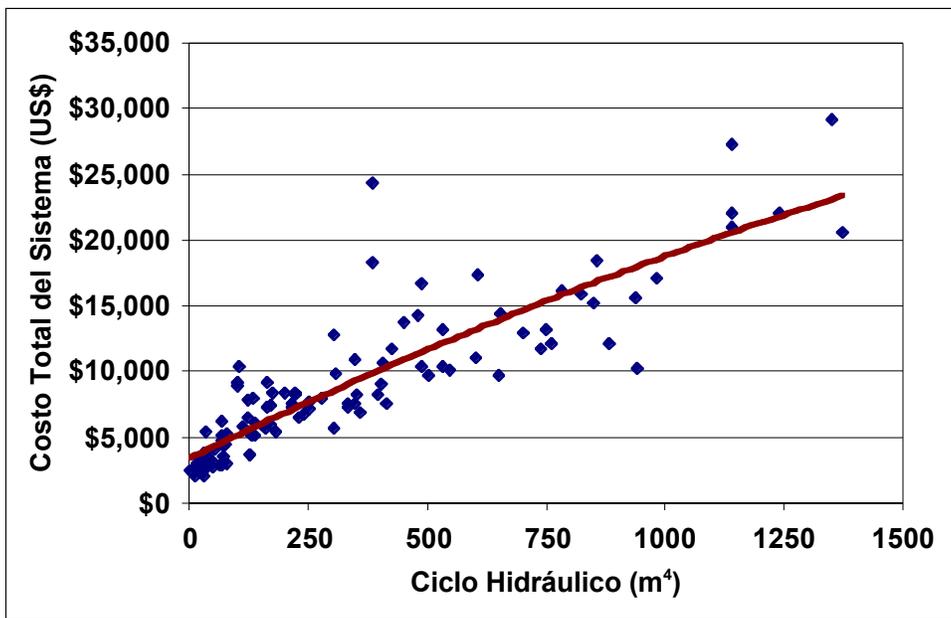


Figura 30. Costos de sistemas instalados en función del ciclo hidráulico diario

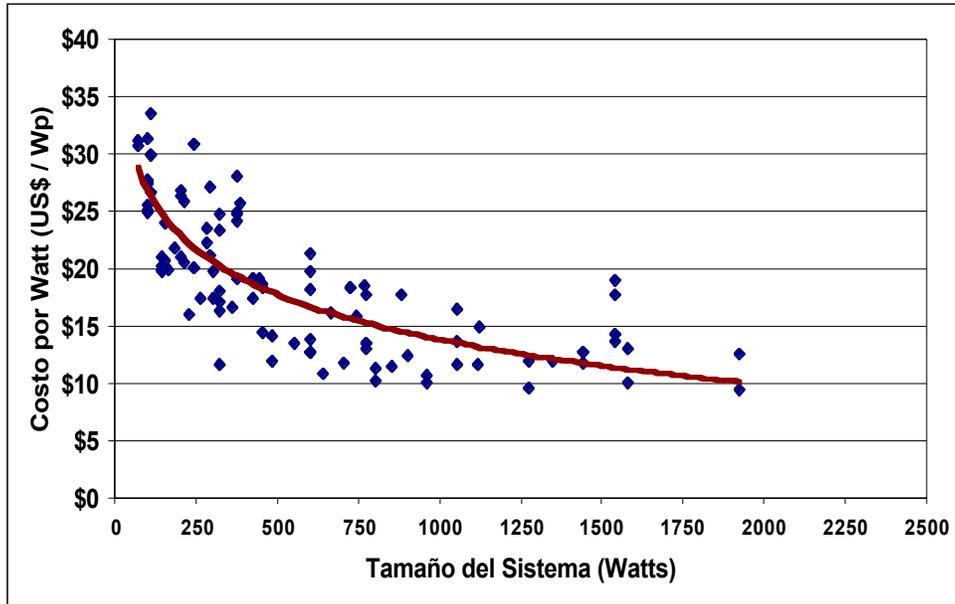


Figura 31. Costo por Watt en función del tamaño del sistema

Otro factor que afecta el costo del sistema es el tipo de equipo que se utiliza. Por ejemplo, los sistemas con bombas de corriente continua generalmente son de costo inicial más bajo debido que estas bombas son más eficientes y no necesitan un inversor. Los componentes eficientes pueden reducir el tamaño del arreglo fotovoltaico requerido y por consiguiente, el costo del sistema. Los sistemas que utilizan seguidores solares también pueden resultar más económicos debido a que pueden operar con un arreglo FV más pequeño para hacer la misma función.

Finalmente, es posible obtener los beneficios de economías de escala si se cotizan paquetes de varios proyectos a la vez, especialmente si los sistemas se instalan en la misma área geográfica.

Comparación de alternativas de bombeo

Por su alto costo inicial, los sistemas solares generalmente no son competitivos en lugares con servicio de electricidad convencional. Cuando no hay acceso a la red eléctrica, los sistemas solares y los de combustión interna son seguramente las alternativas más viables. Si existe un buen recurso solar en el lugar del proyecto (al menos 3.0 horas pico) y **cuando se requiere un ciclo hidráulico menor que 1,500 m⁴ por día, los sistemas solares podrían resultar más económicos a largo plazo que los sistemas de combustión interna.** Aunque los sistemas de combustión interna generalmente cuestan menos inicialmente, su costo a largo plazo es elevado si se toma en consideración los gastos de combustible, mantenimiento y reparaciones.

Cálculo del costo del Ciclo de Vida Útil (CCVU)

Este método permite calcular el costo total de un sistema de bombeo durante un periodo determinado, considerando no sólo los gastos de inversión inicial, sino también los gastos incurridos durante la vida útil del sistema. El CCVU es el "valor presente" del costo de inversión, los gastos de refacciones, operación y mantenimiento, transporte al sitio y el combustible para operar el sistema. Se entiende por valor presente el cálculo de gasto que se realizaría en el futuro y que aplicando las fórmulas para este efecto se estima cuánto dinero se requiere "tener" para sufragar este gasto.:

$$CCVU = CI + R_{vp} + OyM_{vp} + T_{vp} + C_{vp} \quad (1)$$

- **CI (Capital de inversión inicial):** Es el valor presente del capital con que se pagará el equipo, diseño del sistema, ingeniería y gastos de instalación. Esta es la cantidad inicial que el usuario paga. Este costo no se debe de descontar.
- **R_{vp} (Refacciones):** Valor presente de los gastos en piezas de reemplazo que se anticipan a lo largo de vida del sistema.
- **OyM_{vp} (Operación y Mantenimiento):** Valor presente de los gastos de operación y mantenimiento programados. El combustible y refacciones no son incluidos en este costo. El costo de OyM incluye el salario del operador, combustible para llegar al sitio, garantías y mantenimiento.
- **T_{vp} (Transporte):** Valor presente del costo de la transportación al sitio del sistema. Este costo representa el combustible consumido en el viaje al sitio si es necesario para operar el sistema.
- **C_{vp} (Combustible):** Este gasto es el costo del combustible consumido por el equipo de bombeo, si se trata de un sistema de diesel o gasolina.

El CCVU de varias alternativas se puede comparar directamente. La opción con el menor CCVU es la más económica a largo plazo. Note que factores sociales, ambientales y de confiabilidad del sistema no están incluidos en este análisis. Estos factores son difíciles de evaluar en términos económicos, pero deben considerarse al momento de decidir cuál es la mejor opción, principalmente cuando cuando resultan muy similares.

Conceptos básicos

Valor presente (VP) es el costo ajustado al presente de gastos futuros utilizando la **tasa de descuento real** (definida adelante). El pago futuro puede representar un sólo pago o un pago anual.

1. Valor presente de un solo pago hecho en el futuro:

$$VP = VF \times (1 + i_r)^{-n} \quad (2)$$

donde **VP** es el valor presente, **VF** es la cantidad que se paga en el futuro, **i_r** es la tasa de descuento real y **n** es número años entre el presente y el año del pago. Para una tasa de descuento y número de años dados, el factor de valor presente para un pago futuro, dado por $(1 + i_r)^{-n} = FVP$ se puede calcular o simplemente leer de la tabla de **FVP** Factor de *Valor Presente de un Pago con Interés* en el Apéndice D, Tabla D-2.

2. Valor presente de un pago fijo anual:

$$VP = VA \times [(1 - 1 / (1 + i_r)^n) / i_r] \quad (3)$$

donde **VP** es el valor presente, **VA** es la cantidad que se paga anualmente, **i_r** es la tasa de descuento real, y **n** es el periodo en años durante el cual se incurre en el pago anual. Para una tasa de descuento y un periodo dados, el factor de valor presente para pagos anuales, dado por $FVPA = [(1 - 1 / (1 + i_r)^n) / i_r]$ se puede calcular o simplemente leer de la tabla de **FVPA** Factor de *Valor Presente de Pagos Anuales Fijos* en el Apéndice D, Tabla D-3.

Para encontrar el **FVP** y el **FVPA** en las tablas en el Apéndice, simplemente localice la columna que corresponde a la tasa de descuento real y la fila con el número de años. El valor de **FVP** o **FVPA** se encuentra en la casilla donde se cruzan la columna y la fila.

Ejemplo 5

Un sistema FV, tiene una bomba centrífuga sumergible. Según el fabricante, la bomba tiene una vida útil de 10 años. Se anticipa que la bomba será reemplazada en 10 años. El costo de la bomba actualmente es de \$400. La tasa de descuento real para nuestros propósitos la consideraremos en 7%. Según la Tabla D-2, el valor del FVP para una tasa de descuento 7% por ciento y un periodo de 10 años es .5083. Este factor lo multiplicamos por \$400 para obtener el valor presente de la inversión que se hará en 10 años: $VP = \$400 \times 0.5083 = \203 .

Tasa de descuento real (i_r):

$$i_r = \text{tasa de interés} - \text{tasa de inflación}$$

La tasa de interés es la tasa a la que aumenta el capital si es invertido en certificados de depósito (CETES en México). La tasa de inflación es la tasa de aumento general de precios.

En algunos casos, la tasa de inflación anual del combustible es significativamente diferente a la inflación general de precios. Por ejemplo, el precio de combustible en México ha aumentado un promedio de 10% anual en los últimos años, mientras que la inflación general de precios ha alcanzado un promedio de 13% anual en el mismo periodo. Dado que los gastos anuales de combustible representan una buena porción del CCVU de los sistemas de combustión interna, se debe utilizar una tasa de descuento real para el combustible i_{rc} en el cálculo del valor presente:

$$i_{rc} = \text{tasa de interés} - \text{tasa de inflación del combustible}$$

Una vez conocidos la tasa de descuento real y los periodos de tiempo asociados, se puede encontrar el valor presente de cada gasto futuro y finalmente, el CCVU de la opción que se está considerando.

Ejemplo 6

- La tasa interés es 20% anual, la inflación es 13% anual y la inflación del combustible es 10% anual.
- La tasa de descuento real (i_r) es $20\% - 13\% = 7\% = 0.07$. Esta es la tasa que debemos usar para determinar el valor presente de gastos (excepto combustible) hechos en el futuro.
- La tasa interés es 20% anual. La tasa de descuento real del combustible (i_{rc}) es $20\% - 10\% = 10\% = 0.1$. En este ejemplo, esta es la tasa que debemos usar para determinar el valor presente de gastos de combustible.

Pasos para determinar el CCVU

1. Determine el periodo de análisis y la tasa de interés. Para hacer una comparación de CCVU de un equipo solar, generalmente se usa 20 años como periodo de análisis, ya que se considera que este es el tiempo de vida de un sistema de estos.
2. Determine el costo inicial del sistema instalado. La sección anterior muestra cómo estimar el costo inicial de un sistema solar de bombeo. El costo inicial de un sistema de combustión interna varía dependiendo del tipo de sistema sistema. Se pueden utilizar los siguientes valores aproximados:

Tabla 2. Costo aproximado de sistemas de combustión interna

Tipo de sistema	Costo (instalado)
Motobomba (por lo menos 3 Hp)	Más de US\$200/Hp
Generador diesel (por lo menos 4 kW), bomba sumergible	Más de US\$600/kW

- Estime el costo anual de operación y mantenimiento. Para sistemas de combustión interna, se incluye partes (lubricantes, filtros, afinación) y mano de obra para mantenimiento así como el pago del operador del sistema. Si el sistema requiere visitas frecuentes para operación y mantenimiento, el costo del combustible utilizado para transporte al sitio puede ser significativo y se deberá considerar. La bomba es el único componente del sistema solar que está sujeto a desgaste mecánico. Bajo condiciones normales de operación, las bombas centrífugas no necesitan mantenimiento. La mayoría de las bombas pequeñas de diafragma requieren cambio de diafragmas y escobillas cada 3 a 5 años de operación continua.
- Estime la vida útil y el costo de reemplazo de componentes principales del sistema (bomba, motor, generador, etc.) durante el periodo de análisis. La vida útil varía dependiendo de la calidad de los componentes y condiciones de operación. La vida útil de componentes principales y el mantenimiento que requieren se estima basados en experiencia previa o información contenida en manuales del fabricante. Si esta información no está disponible, se pueden usar los siguientes valores aproximados:

Tabla 3. Años de vida útiles de equipo de sistemas FV y sistemas de combustión interna

Componente	Vida útil (años)	Mantenimiento
Arreglo FV y estructuras	20+	Ninguno
Controlador de potencia FV	10+	Ninguno
Motor/bomba centrífuga sumergible	7-10	Ninguno o limpiar los impulsores
Bomba centrífuga superficial	7-10	Ninguno
Motor/bomba de diafragma sumergible	3-5	cambio de diafragmas cada 5 años
CC		
Generador diesel (10 kW)	5-7	aceite, filtros, afinación anual
Motores (3 a 5 Hp)	3-4	aceite, filtros, afinación anual
Motores (6 a 10 Hp)	4-6	aceite, filtros, afinación anual

- Estime el costo anual del combustible que utiliza el sistema. El gasto anual de combustible de un sistema de combustión interna depende de las características de motor que se utiliza y las horas de operación necesarias para bombear agua. El tamaño mínimo de las motobombas comúnmente utilizadas es 3 Hp. Las horas anuales de operación se pueden estimar utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{horas anuales de operación} = \frac{1.33 \times \text{ciclo hidráulico (m}^3/\text{día} \times \text{m)}}{\text{eficiencia de la bomba} \times \text{potencia del motor (Hp)}}$$

Note que la eficiencia de la bomba depende de la carga dinámica total. La experiencia de campo indica que las motobombas en el rango de 3 a 15 Hp consumen aproximadamente 0.25 litros de combustible por hora por cada Hp de potencia. Por consiguiente, el consumo anual de combustible (en litros) se puede estimar como sigue:

$$\text{consumo anual de combustible (litros)} = .25 \text{ litros por hora por Hp} \times \text{potencia del motor (Hp)} \times \text{horas anuales de operación}$$

Para sistemas con generador y bomba sumergible, se usa la misma fórmula para estimar las horas anuales de operación, teniendo en cuenta que la *potencia del motor (Hp)* se refiere a la potencia del motor eléctrico que acciona la bomba. Estos sistemas consumen más combustible debido a que el motor de combustión del generador es más grande que el motor eléctrico de la bomba. Como aproximación, el consumo anual de combustible (en litros) está dado por la fórmula siguiente:

$$\text{consumo anual de combustible (litros)} = 1 \text{ litro por hora por Hp} \times \text{potencia del motor (Hp)} \times \text{horas anuales de operación}$$

donde la *potencia del motor (Hp)* se refiere a la potencia del motor eléctrico que acciona la bomba.

6. Calcule el valor presente de los gastos anteriores utilizando las fórmulas (2) y (3). Calcule el CCVU del sistema utilizando la fórmula (1).

Ejemplos Ilustrativos

Los siguientes ejemplos comparan el CCVU de sistemas solares contra los de combustión interna. Los ejemplos corresponden a sistemas instalados en México entre 1995 y 1998. Se asume que los sistemas comparados bombean el volumen de agua requerido. Además se hacen las siguientes suposiciones:

Tabla 4. Suposiciones del análisis CCV

Periodo de estudio (años)	20
Tasa interés promedio para el periodo de estudio (%)	20%/año
Inflación promedio para el periodo de estudio (%)	10%/año
Inflación de combustible promedio para el periodo de estudio (%)	13%/año
Operación y mantenimiento (sistema fotovoltaico)	2-3% costo inicial/año
Operación y mantenimiento (sistema de combustión interna)	\$200/año
Costo de la mano de obra (\$US/hora)	\$1.00/hora
Costo del combustible en el sitio de uso (\$US/litro)	\$0.6/litro
Tamaño mínimo de motobomba (Hp)	3 Hp
Tamaño mínimo de moto-generador diesel (kW)	4 kW
Visitas anuales de revisión (sistema fotovoltaico)	12 visitas/año
Visitas anuales de mantenimiento (sistema de combustión interna)	52 visitas/año
Costo de transporte por visita de mantenimiento (\$US/visita)	\$6.00/visita
Eficiencia del sistema de bombeo convencional (bomba, generador, fricción, etc.)	15%

Caso de Estudio #1: Sistema Pequeño FV, Villa de Leyva, Quintana Roo



Especificaciones Técnicas

Carga Dinámica Total 5.5 m
 Capacidad de bombeo de agua 2.4 m³
 Ciclo hidráulico 13.2 m⁴

Sistema Fotovoltaico-140 Wp
 Bomba Shurflo 9300

Sistema de combustión interna -3- Hp

Horas anuales de operación 59 horas
 Consumo anual de combustible 176 litros
 Costo total de combustible por año \$83

Sistema Fotovoltaico					Sistema de Combustión Interna				
	Año	Cantidad	FVP o FVPA	Valor Presente		Año	Cantidad	FVP o FVPA	Valor Presente
Costo Inicial	0	\$2,736	1.0000	\$2,736	Costo Inicial	0	\$988	1.000	\$988
Reemplazos					Reemplazos				
Cambio de diafragma	5	\$200	0.7130	\$143	Motobomba #1	6	\$738	0.6663	\$492
Bomba Sumergible #1	10	\$655	0.5083	\$333	Motobomba #2	12	\$738	0.4440	\$328
Cambio de diafragma	15	\$200	0.3624	\$72	Motobomba #3	18	\$738	0.2959	\$218
Operación y Mantenimiento	cada año	\$27	10.594	\$290	Operación y Mantenimiento	cada año	\$200	10.594	\$2,119
Transporte por visita de mantenimiento	cada año	\$72	10.594	\$763	Transporte por visita de mantenimiento	cada año	\$312	10.594	\$3,305
Combustible para bombeo	cada año	\$0	10.594	\$0	Combustible para bombeo	cada año	\$83	10.594	\$879
CCVU (20 años)				\$4,336	CCVU (20 años)				\$8,329

Resultados del Caso de Estudio #1: Sistema Pequeño, Villa de Leyva, Quintana Roo

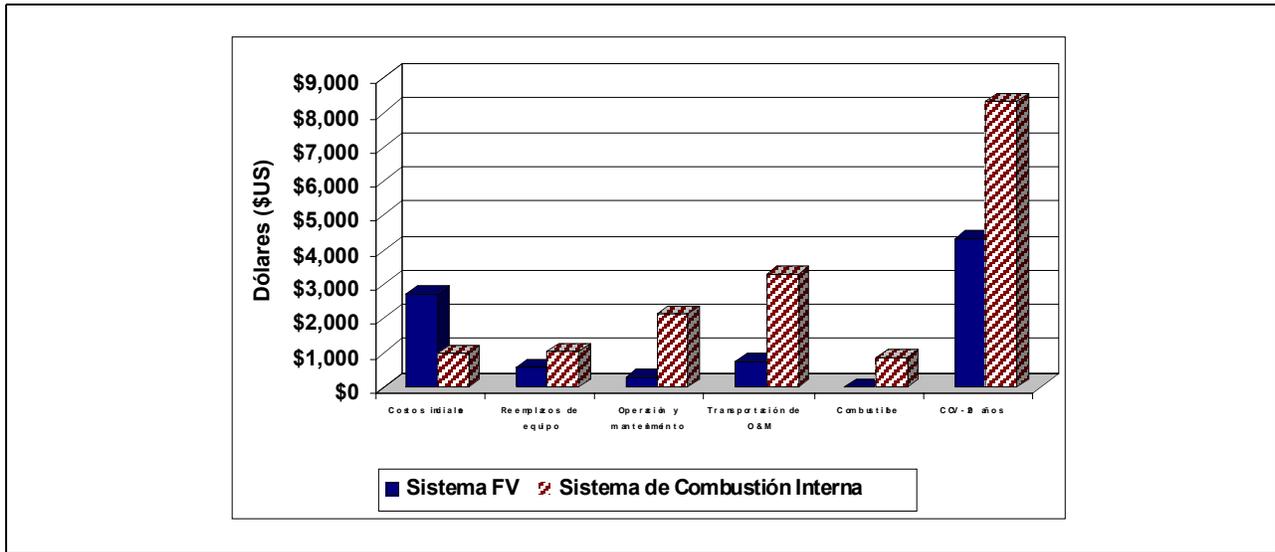


Figura 32. Villa de Leyva, Quintana Roo – Comparación de costos en valores presente

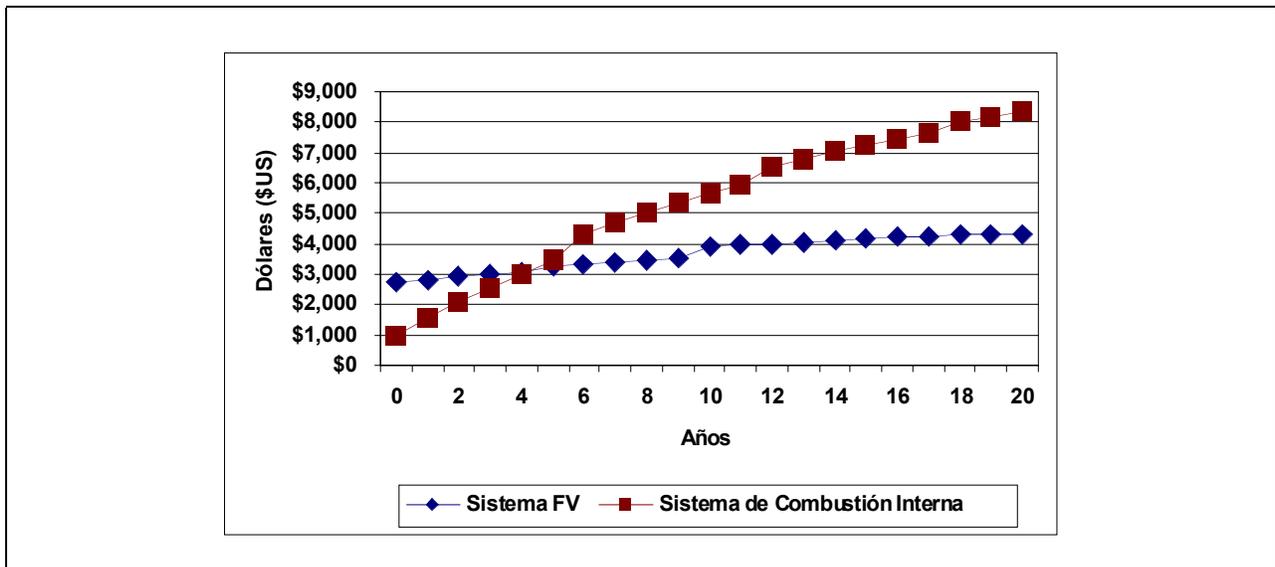


Figura 33. Villa de Leyva, Quintana Roo – Periodo de recuperación de inversión

Caso de Estudio #2. Sistema Mediano FV, El Jeromín, Chihuahua



Especificaciones Técnicas

Carga Dinámica Total 40 m
 Capacidad de bombeo de agua 15.0 m³
 Ciclo hidráulico 600 m⁴

Sistema Fotovoltaico-848 Wp

Bomba Grundfos SP3A-10

Sistema de combustión interna - 15kW

Horas anuales de operación 397 horas
 Consumo anual de combustible 7,980/año
 Costo total de combustible por año \$3,770

Sistema Fotovoltaico					Sistema de Combustión Interna				
	Año	Cantidad	FVP o FVPA	Valor Presente		Año	Cantidad	FVP o FVPA	Valor Presente
Costo Inicial	0	\$10,491	1.0000	\$10,491	Costo Inicial	0	\$3,785	1.000	\$3,785
Reemplazos					Reemplazos				
					Bomba AC	6	\$575	0.6663	\$383
					Generador	10	\$2,910	0.5083	\$1,479
					Bomba AC	12	\$575	0.4440	\$255
					Bomba AC	18	\$575	0.2959	\$170
Operación y Mantenimiento	cada año	\$105	10.594	\$1,111	Operación y Mantenimiento	cada año	\$200	10.594	\$2,119
Transporte por visita de mantenimiento	cada año	\$72	10.594	\$763	Transporte por visita de mantenimiento	cada año	\$312	10.594	\$3,305
Combustible para bombeo	cada año	\$0	10.594	\$0	Combustible para bombeo	cada año	\$3,770	10.594	\$39,939
CCVU (20 años)				\$12,365	CCVU (20 años)				\$51,436

Caso de Estudio #2. Sistema Mediano FV, El Jeromín, Chihuahua



Especificaciones Técnicas

Carga Dinámica Total 40 m
 Capacidad de bombeo de agua 15.0 m³
 Ciclo hidráulico 600 m⁴

Sistema Fotovoltaico-848 Wp

Bomba Grundfos SP3A-10

Sistema de combustión interna - 15kW

Horas anuales de operación 397 horas
 Consumo anual de combustible 7,980/año
 Costo total de combustible por año \$3,770

Sistema Fotovoltaico					Sistema de Combustión Interna				
	Año	Cantidad	FVP o FVPA	Valor Presente		Año	Cantidad	FVP o FVPA	Valor Presente
Costo Inicial	0	\$10,491	1.0000	\$10,491	Costo Inicial	0	\$3,785	1.000	\$3,785
Reemplazos					Reemplazos				
					Bomba AC	6	\$575	0.6663	\$383
					Generador	10	\$2,910	0.5083	\$1,479
					Bomba AC	12	\$575	0.4440	\$255
					Bomba AC	18	\$575	0.2959	\$170
Operación y Mantenimiento	cada año	\$105	10.594	\$1,111	Operación y Mantenimiento	cada año	\$200	10.594	\$2,119
Transporte por visita de mantenimiento	cada año	\$72	10.594	\$763	Transporte por visita de mantenimiento	cada año	\$312	10.594	\$3,305
Combustible para bombeo	cada año	\$0	10.594	\$0	Combustible para bombeo	cada año	\$3,770	10.594	\$39,939
CCVU (20 años)				\$12,365	CCVU (20 años)				\$51,436

Resultados del Caso de Estudio #2 Sistema Mediano, El Jeromín, Chihuahua.

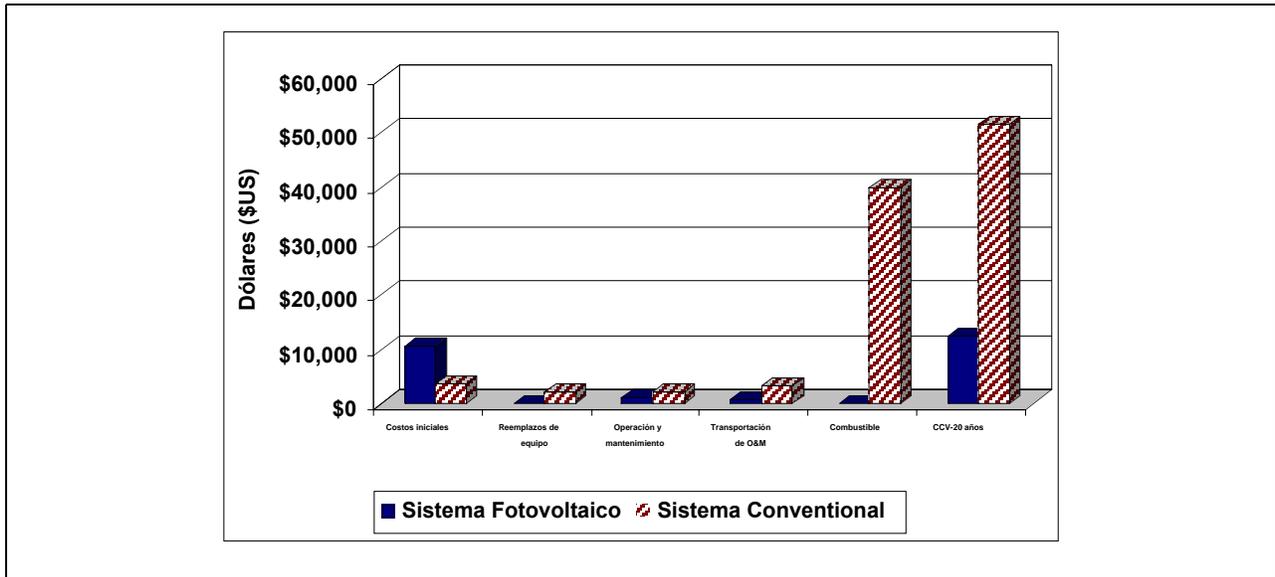


Figura 34. El Jeromín, Chihuahua – Comparación de costos en valores presente

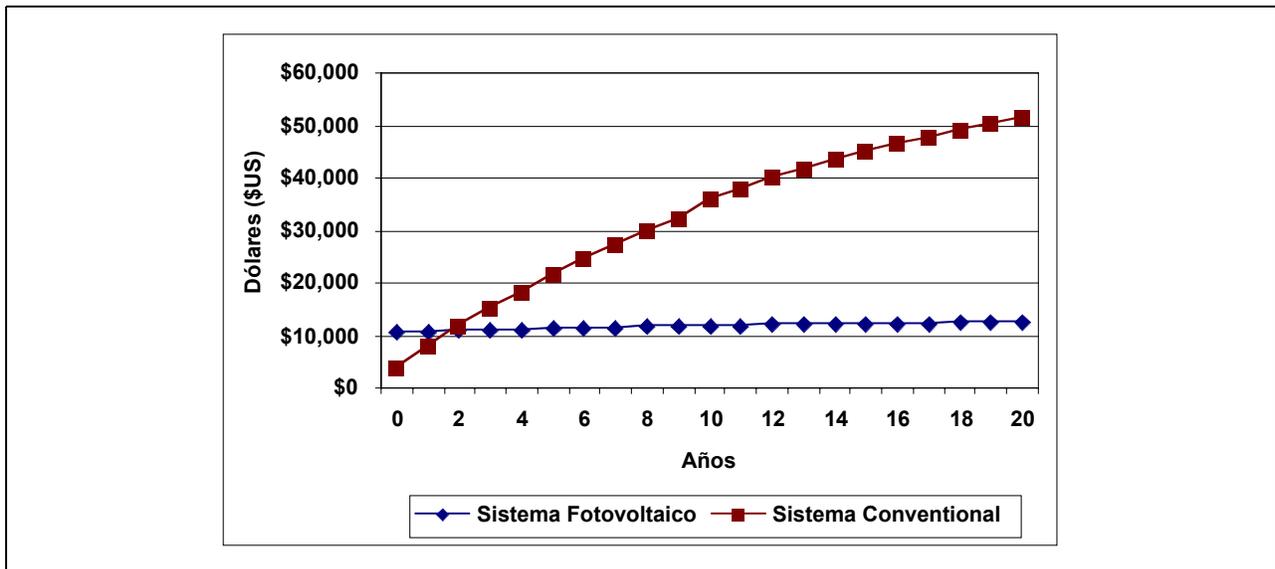


Figura 35. El Jeromín, Chihuahua – Periodo de recuperación de inversión

Caso de Estudio #3. Sistema de Irrigación FV, Agua Blanca, Baja California Sur



Especificaciones Técnicas

Carga Dinámica Total 25 m
 Capacidad de bombeo de agua 25 m³
 Ciclo hidráulico 625 m⁴

Sistema Fotovoltaico - 800 Wp

Sistema de combustión interna - 6 kW

Horas anuales de operación 1,039 horas
 Consumo anual de combustible 20,076 litros
 Costo total de combustible por año \$982



Sistema Fotovoltaico					Sistema de Combustión Interna				
	Año	Cantidad	FVP o FVPA	Valor Presente		Año	Cantidad	FVP o FVPA	Valor Presente
Costo Inicial					Costo Inicial				
Sistema FV	0	\$9,250	1.000	\$9,250	Motobomba	0	\$2,018	1.000	\$2,108
Sistema de riego	0	\$1,325	1.000	\$1,325	Sistema de riego	0	\$1,325	1.000	\$1,325
Pila	0	\$2,160	1.000	\$2,160	Pila	0	\$2,160	1.000	\$2,160
Reemplazos					Reemplazos				
Bomba sumergible	10	\$1,288	0.5083	\$655	Motobomba #1	6	\$1,718	0.6663	\$1,145
					Motobomba #2	12	\$1,718	0.4440	\$763
					Motobomba #3	18	\$1,718	0.2959	\$508
Operación y Mantenimiento	cada año	\$92.50	10.594	\$980	Operación y Mantenimiento	cada año	\$200	10.594	\$2,119
Transporte por visita de mantenimiento	cada año	\$72	10.594	\$763	Transporte por visita de mantenimiento	cada año	\$312	10.594	\$3,305
Combustible para bombeo	cada año	\$0	10.594	\$0	Combustible para bombeo	cada año	\$982	10.594	\$10,401
CCVU (20 años)				\$15,132	CCVU (20 años)				\$23,743

Resultados del Caso de Estudio #3. Sistema de Irrigación, Agua Blanca, Baja California Sur.

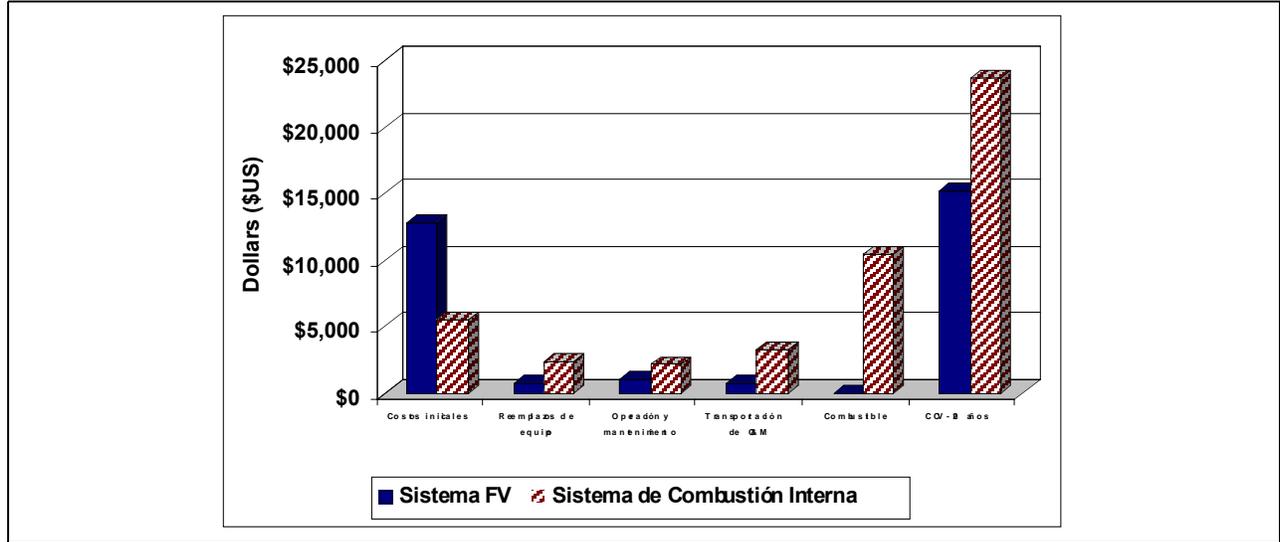


Figura 36. Agua Blanca, Baja California Sur, Comparación de costos en valores presente

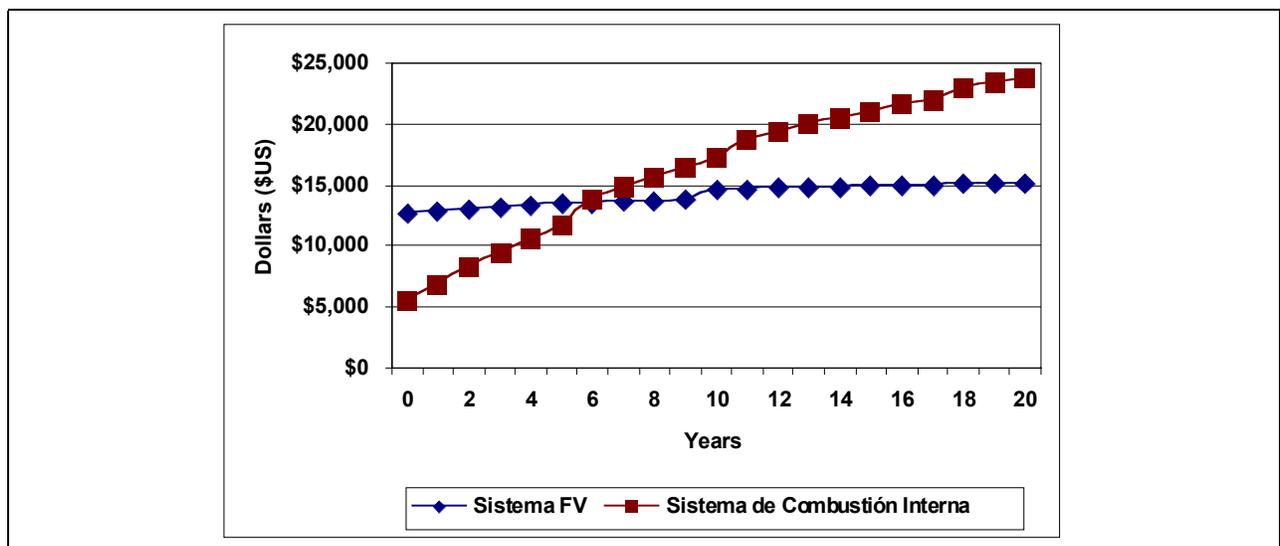


Figura 37. Agua Blanca, Baja California Sur—Periodo de recuperación de inversión



Introducción

Buenas prácticas de operación y mantenimiento son indispensables para asegurar la durabilidad del sistema, la seguridad del operador y la rentabilidad de la inversión. Un sistema FV de bombeo de agua bien diseñado y adecuadamente instalado es seguro, confiable y requiere de poca atención. Sin embargo, el operador debe saber cómo operar el sistema de manera adecuada, los procedimientos de mantenimiento rutinario y el proceso de apagado del sistema en caso de mal funcionamiento. Toda esta información debe estar incluida en un Manual de Operación y Mantenimiento que el proveedor debe facilitar al usuario. El manual también debe contener las garantías del equipo e información sobre el vendedor en caso de que tenga que ser contactado. El manual también debe contener suficiente información para que el operador pueda determinar si el sistema está funcionando apropiadamente (debe conocer el rendimiento esperado en $\text{m}^3/\text{día}$, flujo esperado en L/s cerca del mediodía de un día soleado, el significado de las luces indicadoras en el controlador y las posibles señales de daño en el arreglo, el cableado y la bomba.)

Instalación del sistema

Cualquier componente puede fallar si no es instalado adecuadamente o el mantenimiento no es el apropiado. Como los sistemas de bombeo solar son ensamblados en el campo, se necesita de personal calificado para lograr una instalación profesional y segura. El instalador siempre debe apegarse a los estándares establecidos en los códigos eléctricos y de construcción para maximizar la confiabilidad y durabilidad del sistema. La planeación es esencial, especialmente en localidades remotas. El instalador debe asegurarse que todos los materiales y herramientas estén disponibles en la fecha de instalación. Muchos de los problemas en los sistemas de bombeo de agua tienen que ver con la poca atención que se le da a los detalles. Todas las recomendaciones del fabricante deben ser acatadas. Es posible que se requieran medidas especiales dependiendo de la localidad y las condiciones (heladas, inundaciones, protección contra rayos, vandalismo, etc.) Para facilitar el trabajo, el ensamblador del sistema debe apegarse a un procedimiento de instalación que por lo menos cubra lo siguiente:

- Verificación de la fuente de agua (capacidad de producción por temporada)
- Obra civil (cimientos, tuberías y sistema de almacenamiento)
- Prueba y ensamblaje de los componentes del sistema (mecánicos y eléctricos)
- Comprobación de conexiones mecánicas y eléctricas hechas en el campo
- Verificación de los modos de operación del sistema
- Verificación del desempeño del sistema (prueba de aceptación)
- Entregar manual de operación y mantenimiento al dueño y operador del sistema
- Sesión de entrenamiento al operador del sistema

Cableado y conexiones eléctricas

La experiencia ha mostrado que muchas fallas inesperadas son causadas por malas conexiones eléctricas. Por ejemplo, la luz del sol puede degradar el aislamiento del conductor, y el esfuerzo térmico continuo puede aflojar las conexiones. Estos problemas causan cese de operación y alto costo de reparaciones. El diseñador debe especificar correctamente el calibre y el tipo del cable para la corriente, voltaje, y condiciones de operación. Por ejemplo, todos los cables expuestos deben ser aprobados para uso en intemperie o deben estar protegidos por tubos eléctricos (ductos). El cableado debe estar protegido y sujetado adecuadamente. En muchos casos, es necesario enterrar los cables. Se deberán utilizar cables especiales para enterrado directo, o cables para uso en presencia de agua en ductos. Todas las conexiones eléctricas deben hacerse en una cajas accesibles donde puedan ser inspeccionadas, reparadas y aseguradas mecánicamente. Todo el equipo electrónico y las conexiones eléctricas deben estar protegidos contra la entrada de agua, polvo e insectos. Es importante proteger los cables contra abuso físico, especialmente el cable sumergible a la entrada del pozo. En general, los cables demasiado largos deben de ser evitados para minimizar las pérdidas de voltaje. Los cables para evitar tensiones mecánicas en las conexiones. Todos los cables deben tener alivio de esfuerzo y deben estar sujetos a la estructura utilizando cintilla para cable o corbata negra resistente a los rayos ultravioleta.

Hay que prestar especial atención a la conexión y aislamiento del cable sumergible. En la mayoría de los casos, esta conexión quedará sumergida y por consiguiente debe estar perfectamente sellada y con alivio de tensión para evitar fallas. Normalmente se deben utilizar conectadores cilíndricos del tamaño correcto para el calibre de los cables. Si el calibre del cable sumergible es mayor que el cable de la bomba, utilice el conectador apropiado para el cable sumergible y doble el cable de la bomba para hacer una conexión segura. Nunca intente prensar los conectores sin usar pinzas especiales para aplicar terminales. El aislamiento se puede hacer con un juego de tubos termo compresibles con goma selladora que provee el fabricante de la bomba. Se debe aislar cada conexión individualmente para evitar cortocircuitos; también se debe aplicar aislante de manera similar a toda la conexión. Siga cuidadosamente las recomendaciones del fabricante.

Puesta a tierra

Todos los sistemas FV necesitan un sistema de puesta a tierra para mejorar el rendimiento y la seguridad del personal. Todas las partes metálicas expuestas del sistema deben estar conectadas al electrodo de tierra, incluyendo la estructura del arreglo, los marcos de los módulos y la bomba. El electrodo debe estar instalado lo más cerca posible al arreglo. En algunos países, las normas requieren la puesta a tierra de uno de los conductores del sistema, dependiendo del voltaje.

Obra civil y plomería

Los cimientos que soportan la bomba y el arreglo deben ser críticos. La carga debida al viento puede ser la limitación estructural más importante en sistemas fotovoltaicos grandes. En la mayoría de los casos hay que anclar el arreglo a cimientos de concreto. Para la estructura del

pozo, hay que considerar el peso combinado de la bomba / motor, la tubería de bajada y la columna de agua.

El material de la tubería de bajada y conectadores deben ser resistentes a la corrosión. La tubería de bajada debe soportar la presión de la columna de agua y la tensión provocada por el arranque de la bomba. Las conexiones deben resistir estos esfuerzos sin desarrollar fugas con el tiempo. Las fugas reducen el rendimiento y, en el caso de las bombas de superficie, provocan la pérdida de succión. Las pérdidas por fricción pueden aumentar considerablemente la carga, y por lo tanto bajan el rendimiento del sistema. Para reducir las pérdidas por fricción, evite tuberías de gran longitud o diámetro muy pequeño. También se debe reducir el uso de codos y válvulas. Siempre se deben utilizar tornillos y estructuras de montaje resistentes a la corrosión.

Es recomendable proteger el arreglo FV contra posible abuso físico por animales. Se puede erigir un cerco alrededor del arreglo teniendo cuidado de no sombrear el arreglo entre las 9 de la mañana y las 4 de la tarde.

Instalación de bombas superficiales

Para bombas superficiales, la instalación consiste en ajustar el ensamble de la bomba y tubo de succión a una estructura (típicamente de concreto) sobre la superficie de la fuente de agua. La estructura y los sujetadores deben ser lo suficientemente firmes para absorber las vibraciones y el peso de la columna de agua en la tubería de bajada. Las bombas centrífugas montadas en la superficie tienen una capacidad de succión máxima de alrededor 8 metros. Las bombas de pistón o diafragma también tienen limitaciones de succión. Por esta razón, la distancia vertical entre la bomba y el nivel del agua debe ser minimizada. Para reducir las pérdidas por fricción, se debe instalar una tubería de diámetro ancho e instalar válvulas y el medidor de flujo a la descarga. En la Figura 38 se muestra la instalación de una bomba superficial.



Figure 38. Instalación de una bomba superficial (tipo "pumping jack"), en el Rancho Guadalupe en Chihuahua, México. La carga dinámica total es de 170 m

Las bombas superficiales usan una válvula de pié (válvula check) en el punto más bajo del tubo de succión para prevenir retroalimentación. La válvula de pié también se recomienda para las bombas de desplazamiento positivo. La presencia del agua en el tubo de succión es necesaria para que la bomba opere. Después de cebar la bomba, la válvula de pié debe mantener el tubo de succión completamente llena de agua, incluso cuando la bomba se pare por un tiempo. Si no se cuenta con una válvula de pié, el sistema requerirá cebado (llenar la succión del tubo con agua) en cada arranque. Si la línea de distribución del agua es muy larga es importante instalar también una válvula de pie en el lado de la descarga para evitar daños en la bomba por el golpe de ariete. La succión debe ser instalada lo suficientemente profunda para evitar que el nivel de agua caiga por debajo de la entrada de la bomba; también debe instalarse lo suficientemente lejos del fondo y las paredes del pozo para minimizar bombeo de lodo, arena y desechos, los cuales pueden dañar los componentes de la bomba. Si es probable que el nivel del agua caiga por debajo de la succión, es necesario instalar un interruptor (un flotador o electrodo) para evitar que la bomba opere en seco.

La arena es una de las principales causas de fallas en las bombas. Si el pozo está ubicado en un lugar donde puede penetrar tierra o arena a la bomba, se debe colocar un filtro de arena. La mayoría de las fábricas de bombas suministran filtros de esta clase o recomiendan métodos para reducir el riesgo de daño. Este mismo filtro es útil para impedir que las algas formadas dañen la bomba.

Instalación de bombas sumergibles

La instalación de equipo sumergible generalmente requiere de más habilidades. Por ejemplo, los cilindros de bombeo (tal como los utilizados en las bombas Jack) y bombas de flecha (bombas centrífugas sumergibles con motor en la superficie) utilizan componentes que deben ser instalados dentro del pozo. La instalación manual puede resultar muy difícil sin el uso de equipo pesado. La estructura que carga todo el equipo debe ser más robusta para soportar el peso combinado de la columna de agua, la tubería metálica de bajada y la flecha. Para bombas Jack y de flecha, la alineación y el acoplamiento de las partes móviles es crítico. Cada fabricante provee de instrucciones precisas para esta maniobra.

En el procedimiento de instalación para equipo sumergibles, los juegos eléctricos de motor-bomba son comunes y genéricos en naturaleza. Durante la instalación, el cable de potencia y cables de sensores se sujetan a la tubería de bajada con cinta eléctrica. También es importante instalar una cuerda o cable de seguridad. Es importante que solo la tubería de bajada (no el cable eléctrico o la cuerda de seguridad) sujete el peso de la bomba y la columna de agua. En las bombas centrífugas, se recomienda que el diámetro de la tubería de bajada sea de al menos de 1-1/4 pulgadas para reducir las pérdidas por fricción. En el caso de las bombas de diafragma, es más aconsejable utilizar diámetros más pequeños (1/2 o 3/4 pulgadas) para evitar acumulación de sedimentos sólidos en el diafragma. Algunas bombas reciprocantes trabajan mejor con tuberías flexibles para absorber mejor las pulsaciones.



Figure 39. Instalación de una bomba FV sumergible en Estación Torres, Sonora, México

Operación y mantenimiento del sistema

Los sistemas FV de bombeo de agua bien diseñados y adecuadamente instalados son muy sencillos de operar y mantener. Típicamente, el sistema tiene que arrancar y parar dependiendo de la demanda y disponibilidad de agua, así como también de la fuente solar. Con la utilización de interruptores (flotador y electrodo), la mayoría de los sistemas pueden automatizar sus funciones a un costo adicional relativamente bajo, especialmente cuando se usa un motor eléctrico. Cuando sea necesario, el interruptor del sistema se puede utilizar para apagar manualmente la bomba. El apagado manual es necesario para reparaciones o modificaciones del sistema de distribución de agua, cuando se realicen reparaciones al sistema eléctrico y cuando se extraiga la bomba para inspección, mantenimiento o reparación. El sistema comenzará a operar normalmente cuando se accione el interruptor a la posición de encendido.

El personal responsable de la operación y el mantenimiento debe ser entrenado adecuadamente. El instalador del sistema debe proveer un *Manual de Operación y Mantenimiento*, estableciendo los principios de operación del sistema, el mantenimiento de rutina y los requerimientos de servicio. En él también debe estar incluida información referente a seguridad y a los problemas que comúnmente se presentan en esta clase de instalaciones. La manera más efectiva para maximizar los beneficios de los sistemas de bombeo de agua es llevando a cabo un mantenimiento preventivo. El programa de mantenimiento preventivo debe estar diseñado para maximizar el costo de vida útil del sistema. Por supuesto, cada tipo de sistema tiene diferentes requisitos de mantenimiento. Las condiciones específicas de operación impondrán requisitos adicionales. En general, el mantenimiento de un sistema fotovoltaico de bombeo requiere lo siguiente:

- **Mantenimiento de rutina y reparaciones menores.** Se incluye el monitoreo de desempeño del sistema, el nivel agua y su calidad. Una inspección visual puede detectar ruidos o vibraciones inusuales, corrosión, invasión de insectos, componentes o conexiones eléctricas sueltas, fugas de agua, algas, etc. La mayoría de estos problemas pueden ser corregidos en el campo. El operador del sistema (típicamente el propietario) debe ser capaz de realizar todo el mantenimiento de rutina y las reparaciones menores. El mantenimiento rutinario ayudará a detectar y corregir la mayoría de los pequeños problemas que con el tiempo se pueden convertir en mayores problemas que pueden dejar inoperable el equipo.
- **Reparaciones preventivas y correctivas.** Se incluyen los reemplazos o reparación de componentes tales como, reemplazo del diafragma o impulsores, y reemplazo de los componentes defectuosos. Este tipo de mantenimiento puede requerir herramientas especiales y conocimiento. En la mayoría de los casos, es necesario que personal capacitado haga las reparaciones.

El arreglo FV

Los requerimientos en los sistemas FV de agua son bajos comparados con las otras tecnologías. Uno de los puntos más importantes de los FV's es prevenir las sombras en el arreglo. Hierbas y árboles cercanos pueden sombrear al paso del tiempo. No es necesario limpiar los módulos, e incluso cuando hay exceso de polvo la eficiencia del arreglo FV disminuye solamente un 2 a 4%. Si la estructura del arreglo lo permite, el arreglo puede ser ajustado dos veces al año para obtener mejor rendimiento. El mantenimiento en campo de los controladores consiste en asegurar un buen sellado para evitar polvos, agua o insectos.

Bombas y motores

Desde el punto de vista operacional, el requisito más importante es evitar la operación de una bomba en seco debido a que el motor se sobrecalentará y se quemará. El agua es necesaria para la lubricación y disipación de calor. En el caso de las bombas centrífugas superficiales, es necesario comprobar que no existan fugas en la tubería de succión o en la válvula check si la bomba frecuentemente necesita cebado. Del mismo modo, el operador nunca debe permitir que la bomba trabaje contra una descarga obstruida, lo cual puede provocar un sobrecalentamiento en el motor, y excesiva tensión mecánica. Las bombas centrífugas (superficiales o sumergibles) requieren de poco mantenimiento. La mayoría de los problemas que se presentan son debidos al exceso de arena, agua corrosiva y con alto contenido de mineral. Estos agentes atacan los impulsores o la cubierta de la bomba. Puede darse el caso que la bomba no falle completamente, pero su rendimiento sí puede disminuir bastante. Algunas bombas pueden ser reconstruidas al reemplazar los impulsores y los sellos de agua; no obstante, el reemplazo de la bomba completa puede ser más económico. El monitoreo adecuado de la producción de agua permite al propietario determinar cuando se debe reemplazar la bomba. Algas y otra materia orgánica pueden obstruir la entrada de la bomba. Las bombas sumergibles son de acero inoxidable y deben durar operando más tiempo.

Las bombas de desplazamiento positivo usan más componentes sujetos a desgaste. Por esta razón, se le debe proporcionar más mantenimiento que a otras clases de bombas. Bajo condiciones apropiadas de operación, los diafragmas necesitan ser reemplazados cada 2 a 3 años

(más frecuente en aguas arenosas). Los sellos de las bombas de pistón pueden durar entre 3 y 5 años. Los diafragmas y sellos fallan prematuramente cuando hay exceso de arena lo cual desgasta más rápido los componentes y cuando trabajan a presiones más altas. La mayoría de las bombas de desplazamiento positivo pueden ser reconstruidas varias veces en el campo antes de desecharlas.

Los motores ac y dc sin escobillas no requieren de mantenimiento en el campo y pueden durar entre 10 y 20 años bajo condiciones ideales de operación. Los motores con escobillas requieren reemplazo periódico de las escobillas. Esta es una operación muy sencilla en la mayoría de los diseños. Las escobillas deben ser reemplazadas con componentes abastecidos por el fabricante para garantizar el buen desempeño del equipo. Los motores pequeños con escobillas pueden durar entre 4 y 8 años dependiendo del uso.



Consideraciones Institucionales del Desarrollo con Energía Renovable

El bombeo de agua es una de las más sencillas, costeables y adecuadas aplicaciones de las tecnologías de energía solar en comunidades rurales; no obstante, al igual que todos los proyectos de desarrollo, la consideración de los aspectos institucionales es crítica para el éxito a largo plazo. El enlace crítico de cualquier proyecto de energía renovable no es sólo la tecnología que se usa, sino también las agencias que lo desarrollan y la infraestructura de apoyo. Los aspectos técnicos son importantes para asegurar la implementación exitosa de proyectos con energía renovable, aunque esto no es suficiente para garantizar el futuro de un proyecto. A menudo, diseños e instalaciones que son técnicamente aceptables fracasan debido a la falta de enfoque en los aspectos institucionales. Esto es especialmente cierto en programas de desarrollo que introducen nuevas tecnologías como el bombeo de agua solar y eólico en entornos rurales. Sin embargo, como en cualquier sistema mecánico o eléctrico, la agencia de implementación así como el usuario deben estar preparados para dar mantenimiento al sistema para asegurar una larga duración del sistema. Desafortunadamente, esta perspectiva de largo plazo institucional frecuentemente está ausente en los programas de desarrollo con energía renovable. Un programa de energía renovable factible debe tomar en cuenta el aspecto del mantenimiento y otros asuntos institucionales necesarios para la sustentabilidad a largo plazo. Los aspectos institucionales que deben considerarse incluyen los aspectos políticos y sociales, capacidad de construcción, asistencia técnica, educación y capacitación, así como el desarrollo de la infraestructura local.

Sustentabilidad

El desarrollo sustentable, de ahora en adelante llamado sustentabilidad, es el logro continuo del desarrollo económico y social sin detrimento de los recursos ambientales y naturales. Por ejemplo, con el uso de tecnologías de energía renovable para el bombeo de agua en áreas rurales la sustentabilidad proporciona al usuario (los consumidores) el acceso local a proveedores calificados, equipo de alta calidad, capacidades de mantenimiento a precios y planes de pago razonables. Debido a la mayor inversión de capital inicial de los sistemas de bombeo de agua con energía renovable, comparados con tecnologías convencionales, el acceso a un financiamiento razonable con frecuencia es un factor importante en la sustentabilidad de las tecnologías rurales de energía renovable. La sustentabilidad a largo plazo es una consecuencia natural del crecimiento del mercado local. Donde la demanda de un producto o servicio es lo suficientemente alta para permitir la obtención de ganancias y creación de la competencia, las fuerzas del mercado eventualmente establecen la infraestructura necesaria para la generación de un mercado local.

La meta de los programas de desarrollo con energía renovable debe ser proporcionar servicios necesarios, como cuidado de la salud, a la vez que se contribuye al crecimiento local del mercado y a la sustentabilidad. Con frecuencia, los programas de desarrollo se realizan en regiones económicamente deprimidas donde la posibilidad del consumidor para pagar es baja y la

infraestructura de abastecimiento es inadecuada o inexistente. La implementación de programas a menudo tiene lugar en el contexto de programas sociales que incluyen varias formas de subsidio de gobiernos u otras organizaciones. Aunque los programas de subsidio no son por sí mismos inherentemente sustentables, son justificables y pueden hacer contribuciones socialmente significativas y pueden usarse como catalizador para desarrollar cuidadosamente mercados para tecnologías de energía renovable.

Consideraciones institucionales

Hay varias consideraciones institucionales que deben tomarse en cuenta para lograr sustentabilidad en proyectos de bombeo de agua con energía renovable. Las siguientes secciones tratan algunas de las áreas clave a considerar para el desarrollo institucional de proyectos de energía renovable.

Aspectos políticos

La implementación de proyectos con energía renovable tienen mayor éxito cuando existen políticas favorables nacionales, estatales o locales. El reconocimiento de los beneficios sociales, ambientales y de salud de los sistemas de bombeo de agua con energía renovable en áreas rurales puede ayudar a políticas sólidas sobre requisitos de importación, impuestos, subsidios a combustibles fósiles y otros obstáculos gubernamentales que pueden artificialmente aumentar el costo de sistemas con energía renovable instalados. Los programas gubernamentales ya establecidos en funciones y en áreas como la agricultura, ganadería y agua potable pueden justificar la participación directa de agencias gubernamentales en la implementación de programas de energía renovable. Tales programas son vehículos valiosos en la promoción de estas tecnologías y en la educación de los potenciales usuarios. Las políticas favorables animan a los emprendedores y al amplio crecimiento del mercado

Fomento alianzas sólidas: Las alianzas fuertes entre las agencias gubernamentales, industriales y de desarrollo deben fomentarse para que los programas de bombeo de agua con energía renovable tomen en cuenta los diversos aspectos culturales, técnicos sociales e institucionales a los que se enfrentarán para lograr sus metas. El éxito de un programa de bombeo de agua con energía renovable depende de trabajar con organizaciones internas y con la industria. Además, el equipo mismo del programa, el cual está compuesto de miembros de diferentes organizaciones, debe funcionar bien en conjunto. Es importante seleccionar cuidadosamente a los socios.



Formación de capacidad

Se requieren significativos esfuerzos para ayudar a los socios en la formación de su capacidad necesaria para evaluar independientemente y desarrollar con éxito proyectos de energía renovable. La formación de capacidad incluye la asistencia técnica, talleres formales de

capacitación, actividades de campo enfocadas y una minuciosa revisión de las cotizaciones y diseños en las propuestas de los proveedores de los sistemas.

El apoyo y la capacitación de la comunidad local es decisivo para un programa exitoso de bombeo de agua con renovables. Es crítica la capacitación extensa en el desarrollo del interés y los conocimientos necesarios para entender y aplicar con éxito tecnologías de energía renovable. Es esencial que haya una estructura que asista a los socios a la formación de la capacidad necesaria para operar y mantener un sistema de bombeo de agua con energía renovable. La asistencia técnica y el entrenamiento son procesos continuos que funcionan mejor de una manera incremental con el tiempo. Es importante no sólo capacitar a los desarrolladores de proyectos, sino también a la industria local (lado de la oferta). Los proveedores de sistemas también necesitan ocasionalmente regresar y revisar (y reparar, de ser el caso) sus instalaciones. El éxito depende en gran medida de la capacidad técnica de los técnicos y administradores locales que continúan operando un sistema de bombeo de agua mucho después de su inauguración. Una mayor capacidad técnica de los proveedores locales lleva a una mayor confianza de los consumidores y de las agencias de implementación en términos de asegurar proyectos de buena calidad.

Educación y capacitación

Un programa exitoso de energía renovable absolutamente requiere del desarrollo de las capacidades técnicas locales y consumidores informados. Uno de los muchos componentes que aseguran una instalación de buena calidad es la capacitación de los proveedores, desarrolladores de proyectos y personal gubernamental. Además, el entrenamiento tiene un importante papel al asegurarse que la tecnología se está usando adecuadamente. Los proveedores y usuarios deben reconocer la importancia de las localidades y de las aplicaciones en los que el bombeo de agua fotovoltaico o eólico tenga sentido, así como reconocer aquellos en los que no sea apropiado.

Los usuarios deben recibir capacitación en la operación básica y mantenimiento de sistemas de energía renovable. Esta capacitación es un componente vital que asegura una larga vida al sistema. Para mejorar la efectividad de un sistema de energía renovable, los usuarios deben observar prácticas de conservación y manejo de recursos. La educación tiene un importante papel en esta área. Los recursos invertidos en la capacitación se justifican con la mejor economía de sistemas más confiables y de mayor duración.



Figura 40. Curso de capacitación de Sandia en energía solar en Veracruz, México

Asistencia técnica

La asistencia técnica puede tomar una variedad de formas, desde el trabajo con socios locales y desarrolladores locales, hasta dar asistencia técnica a proveedores locales de sistemas. Es importante trabajar con socios locales (desarrolladores de proyectos) para desarrollar especificaciones técnicas prácticas para sistemas de energía renovable. Esto permite un entendimiento básico de lo que se necesita para una instalación de buena calidad que dará años de vida útil. También es importante trabajar con proveedores locales para asegurarse de que entienden lo que específicamente se requiere para cumplir con las especificaciones técnicas.

La importancia de incluir a la industria en todos los aspectos de un programa de bombeo de agua con energía renovable no puede enfatizarse más. A nivel local, la sustentabilidad y el crecimiento de los mercados puede sólo asegurarse si existe una fuerte infraestructura de la oferta y si los sistemas instalados funcionan confiablemente con el tiempo. Los desarrolladores de proyectos deben trabajar muy cercanos a sus proveedores locales para ayudar a fortalecer su posibilidad de entregar sistemas de alta calidad a precios razonables. Debe animarse a los proveedores a tomar cursos de entrenamiento, instalar sistemas pilotos y desarrollar sus propios programas de entrenamiento.

Los mapas de recursos solares de regiones específicas son útiles para determinar dónde es mejor aplicar tecnologías específicas. Estos mapas son valiosas herramientas para las organizaciones socio y para los proveedores de sistemas a medida que trabajan para determinar las regiones más factibles para tecnologías de energía renovable.

Desarrollo de la infraestructura local

El establecimiento de la infraestructura local es indispensable para la sustentabilidad. Una adecuada infraestructura proporciona acceso a sistemas, componentes y servicios técnicos calificados. En áreas rurales, la mayoría de los proveedores de energía renovable dependen de

proveedores externos para su equipo y diseño de sistemas. Sin embargo, los costos bajan cuando los proveedores pueden hacer sus propios diseños, instalaciones, mantenimiento y reparaciones. Unas relaciones comerciales saludables entre los vendedores locales y sus proveedores por lo general bajan los costos para los usuarios. En un buen ambiente comercial, los proveedores están más dispuestos a apoyar a los vendedores locales con asistencia técnica y precios de descuento.



Figura 41. Mulas empleadas para transportar módulos fotovoltaicos a un área remota de Chihuahua, México

Implementación de programas

La implementación de un programa de energía renovable puede realizarse con éxito por organizaciones gubernamentales, no gubernamentales o la industria privada. Cada organización de implementación, tendrá diferentes metas y objetivos; sin embargo, al combinar el trabajo en colaboración de estas agencias puede dar muy buenos resultados.

Las agencias gubernamentales tienen la habilidad de fijar y hacer cumplir requisitos para la adquisición y control de calidad. Además, a menudo tienen bastantes recursos humanos e infraestructura a su disposición para cubrir una amplia área geográfica. También están en posición de promover el uso de energía renovable como una alternativa a los sistemas de bombeo de agua convencionales en otros programas agropecuarios o de agua potable. Los desarrolladores de programas deben incluir la energía renovable en los programas de desarrollo existentes como parte de la solución para alcanzar las metas del programa (en vez de enfocarse sólo a la energía renovable). Tome en cuenta que el personal gubernamental a menudo no tiene la experiencia técnica necesaria para desarrollar un programa de energía renovable por su cuenta.

La experiencia muestra que las organizaciones no gubernamentales (ONGs) que canalizan sus esfuerzos a la energía renovable pueden ser muy eficientes en la implementación de programas

de energía renovable. En años recientes, algunas ONGs han tenido éxito obteniendo fondos para realizar proyectos de desarrollo en áreas rurales. La clave para que una ONG aplique con éxito la energía renovable es evitar la trampa de ser el instalador del sistema. Es mejor trabajar con un proveedor local de sistemas y tomar un papel de supervisión. Desafortunadamente, a veces este es el caso en que las ONGs han recibido fondos para programas de energía renovable pero cuentan con pocos conocimientos o poco compromiso. A su vez, han utilizado los recursos ineficientemente y han instalado sistemas de baja calidad que le crean a la industria un daño en su imagen. Estos sistemas sólo han retrasado el avance de la energía renovable en muchas regiones. El mayor error que una ONG puede cometer es instalar un sistema y no proporcionar ningún plan de mantenimiento y soporte a largo plazo.

Los más importantes aspectos necesarios para la exitosa implementación de programas de energía renovable incluyen los siguientes:

Realice planes estratégicos

La planeación estratégica con los socios colaboradores ayuda a crear metas realistas para incluir renovables como parte de los programas instituidos. La planeación temprana debe ser realista y dentro de los límites de los recursos disponibles; en otras palabras, hacer bien una sola cosa es mejor que hacer pobremente muchas cosas. La planeación debe incluir suficientes actividades de promoción para acelerar la aceptación de la tecnología, incluyendo la capacitación. El desarrollo de un plan integral desde la etapa de identificación del proyecto hasta la prueba de aceptación y operación, son materias vitales que los desarrolladores locales deben aprender y dominar, aunque debe mantenerse el programa lo más sencillo y directo que sea posible. En general, existen muchas más opciones de asociación y aprovechamiento de oportunidades de las que los recursos pueden soportar; por lo tanto, enfóquese, límitese y tenga éxito en unas cuantas localidades en vez de expandirse. Generalmente, los programas apoyados por el gobierno, dictan ciclos de un año en los que basan sus planes y presupuestos. Los programas de desarrollo con renovables se benefician grandemente con presupuestos para varios años, principalmente porque los resultados significativos tienden a dar resultados sólo después de varios años de esfuerzo constante.

Implementación de proyectos piloto

Los proyectos piloto pueden proporcionar una importante cimentación para el desarrollo de mercados de energía renovable sustentables. Los proveedores locales tienen una oportunidad de adquirir una mejor comprensión técnica de la integración de sistemas de energía renovable, además han aprendido que con una adecuada planeación y diseño, se hace bajo el costo de mantener los sistemas instalados a largo plazo. Como resultado de los proyectos piloto y a la demanda gradualmente en crecimiento, los precios a los usuarios por lo general bajan en las áreas donde estos proyectos piloto se han implementado bien.



Figura 42. Instalación de un sistema piloto de bombeo FV de agua en el estado de Chihuahua, México

Un ejemplo de cómo los proyectos piloto pueden tener un considerable impacto en la reducción de costos se da en México donde el Programa Mexicano de Energía Renovable del Departamento de Energía y la Agencia Para el Desarrollo Internacional de los Estados Unidos (USAID) y dirigido por Sandia National Laboratories (SNL) ha ayudado a la industria Mexicana de energía renovable a extenderse. Esta tendencia al crecimiento y el aumento de la competencia han tenido un importante impacto al bajar los precios en general de los sistemas instalados, a la vez que los niveles de calidad han mejorado sustancialmente. Por ejemplo, los costos de sistemas de bombeo de agua fotovoltaico instalados en México se han estado registrando en New Mexico State University y han mostrado una baja de más de 30% entre 1996 y 1998 como se muestra en la Figura 43. Esto sucede a medida que los vendedores y administradores de programas adquieren experiencia con las tecnologías, a pesar de que los precios de los módulos FV no han bajado de manera similar en el mismo periodo de tiempo. Note que los costos incluyen todos los componentes del equipo (bombas, conductores, etc.) así como mano de obra e impuestos (IVA 15%). Muchos de estos mismos vendedores también han expandido sus territorios de servicio a otros estados, contribuyendo aún más a una mayor competencia y a la baja de precios de sistemas por todo México.

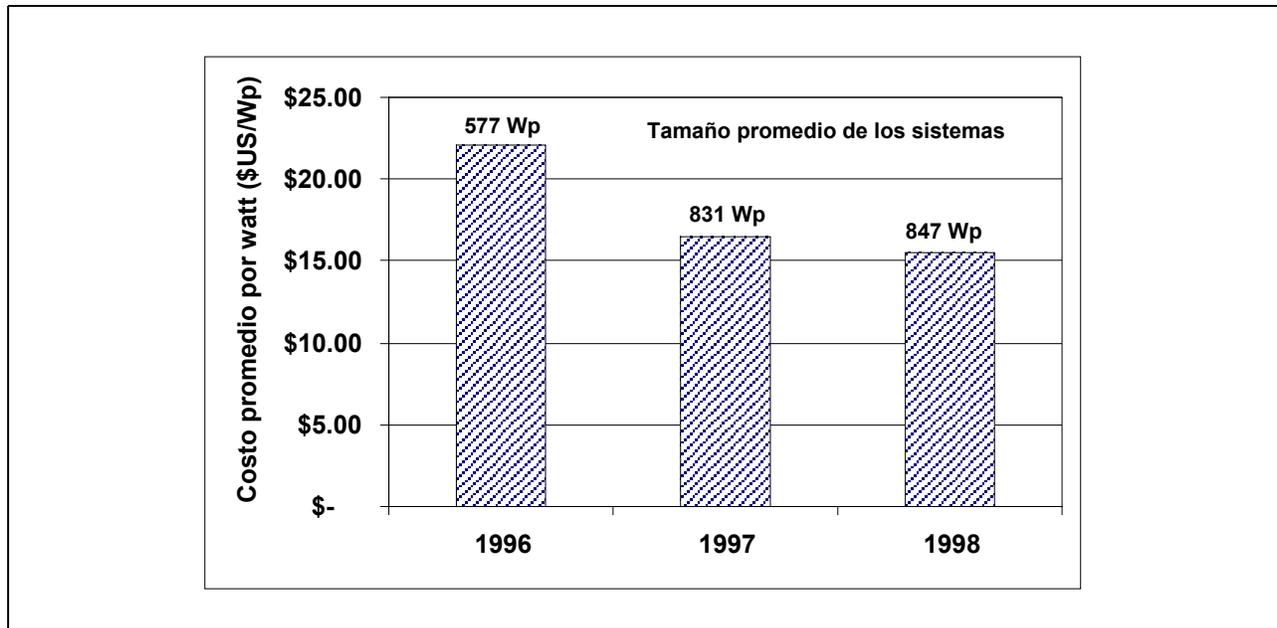


Figura 43. Tendencia a la baja del costo promedio por Watt instalado en 41 sistemas de bombeo de agua FV piloto en México implementado por el Grupo de Trabajo de Energía Renovable en Chihuahua junto con SNL y NMSU

Creación de mercados sustentables

La inversión en los gastos compartidos de los proyectos piloto en mucho facilitan la introducción y aceptación de tecnologías de energía renovable a la vez que otorgan un sentimiento de propiedad entre la localidad. A medida que el volumen de los proyectos aumenta, los precios de los sistemas se reducen debido al aumento de competencia. Los renovables deben tener precios accesibles a la población rural, ya sea por medio de gastos compartidos o por financiamiento. El financiamiento a los usuarios a un nivel a su alcance comparable a otros gastos en energía convencional, reduce la inversión inicial y expande el mercado de energía renovable. Los proyectos piloto deben usarse como una herramienta, no como un fin. Los proyectos piloto deben instalarse para establecer mercados sustentables y en crecimiento, no sólo para señalar el número de instalaciones logradas durante el proyecto. Su principal valor es como herramienta para el entrenamiento y la formación de capacidad de las organizaciones de implementación, los negocios y la comunidad (usuarios).

Adopte un método de desarrollo entre la población

Un método de desarrollo integral y de bases entre la población es necesario para el desarrollo de sistemas híbridos para poblaciones enteras. Un promotor local y con capacidad facilita en gran medida el desarrollo local de los renovables. Si se desea que un sistema híbrido rural para una población tenga éxito y un impacto duradero, debe instalarse el sistema primero con una

perspectiva de desarrollo. La propiedad del sistema y su responsabilidad deben establecerse tempranamente en el desarrollo de los proyectos.

Instale el equipo adecuado

Muchos programas de energía renovable y sus sistemas sufrieron de mala reputación debido a la instalación de diseños y componentes de calidad inferior. Hay una tendencia en algunos programas de desarrollo, especialmente aquellos que atienden a poblaciones rurales pobres, a ofrecer soluciones baratas y de baja calidad para satisfacer sus necesidades. Aún la población rural más pobre merece componentes seguros y de alta calidad así como diseños para recibir el mejor servicio posible de las tecnologías de energía renovable. Los sistemas inferiores sólo crean la imagen de que sistemas de energía renovable son limitados, que no funcionan bien y que se descomponen fácilmente. Las instalaciones de calidad necesitan componentes de buena calidad y diseños seguros, confiables y de larga duración. Un sistema que no puede hacerse bien desde el inicio no debe instalarse.

En cualquier proyecto de energía renovable, el primer paso en el diseño de un buen sistema es usar equipo de uso eficiente de energía. Podría ser completamente adecuado establecer contratos de servicio con los usuarios de sistemas de bombeo de agua comunitarios.

Monitoreo

Una característica de los programas de desarrollo con energía renovable que los hace diferente de otros programas menos sobresalientes es cuando hay un compromiso genuino de dar seguimiento y monitoreo a los proyectos. Las actividades de monitoreo deben incluirse en cualquier programa desde su concepción y enfocarse a varios asuntos, incluyendo los impactos técnicos, sociales, económicos y ambientales de los usos adecuados de la tecnología y sus aplicaciones. Los datos de monitoreo pueden venir de una variedad de fuentes, incluyendo entrevistas con las agencias socio, proveedores y usuarios; visitas a las localidades, así como el monitoreo del rendimiento de los sistemas instalados. Los impactos a largo plazo no pueden evaluarse sin actividades de monitoreo. Es mucho más útil recibir fotografías y datos de sistemas en operación en el campo después de cinco años que una bonita fotografía de un sistema nuevo en el día de su inauguración que podría estar condenada a fallar debido a la falta de una infraestructura de mantenimiento.

Las actividades de monitoreo deben aspirar a desarrollar una colección de una variedad de proyectos y tecnologías para la evaluación a largo plazo. Es valioso mantener una base de datos de proyectos aplicables e información de los programas provenientes del personal de campo. Al mantener una base de datos, se le permite al personal analizar y hacer los ajustes necesarios a medida que avanza la implementación del programa. Como cualquier programa continúa su transición de la directa implementación de proyectos piloto hacia una mayor reproducción e institucionalización de las organizaciones socio, estos esfuerzos de monitoreo crecen continuamente en importancia.

Modelos institucionales para disseminación de la energía renovable

La reproducción de proyectos, o el crecimiento sustentable de los mercados, es el mejor indicador del éxito o fracaso de un programa y puede suceder de varias maneras. A medida que las instituciones socio y los usuarios adquieren familiaridad en el uso de tecnologías de energía renovable, empiezan a implementar nuevos proyectos por su cuenta. Generalmente esto sucede en una región específica y luego se esparce a nuevas regiones. Por medio de tales actividades, otras instituciones relacionadas se familiarizan con los méritos de las tecnologías de energía renovable e inician sus propios proyectos también. El potencial para este tipo de reproducción podría ser enorme, ya que el presupuesto para las organizaciones de desarrollo podría ser de millones de dólares. Como resultado del éxito de los proyectos piloto, se inicia una reproducción de proyectos en el sector privado. Para que la reproducción sea sustancial, hay considerar adecuadamente varios factores: la población local debe conocer la tecnología y lo que puede esperar de ella; debe haber disponibilidad local de productos y servicios de calidad y debe existir la capacidad para pagar por la tecnología. Por esta última razón, es importantísimo que haya mecanismos adecuados de financiamiento.

El costo inicial de los renovables para el bombeo de agua podría ser prohibitivo para muchos campesinos y ganaderos en regiones menos desarrolladas, a pesar de que los costos del ciclo de vida nivelado del bombeo de agua con energía renovable a menudo son muy buenos comparados con sistemas convencionales de bombeo de agua. A veces, hay disponibles fondos de desarrollo para reducir el costo de los sistemas y hacerlos más accesibles.

La implementación de programas de parte de la iniciativa privada es relativamente rara en el área de desarrollo rural con renovables, aunque algunas organizaciones han tenido bastante éxito, especialmente en el área de financiamiento. Los programas encabezados por intereses privados tienen la ventaja de que la sustentabilidad está de acuerdo a los intereses de la organización ejecutora.

Cuatro métodos básicos que se utilizan para comprar sistemas de energía renovable son:

- Ventas al contado
- Ventas con financiamiento
- Contratos (servicio de energía)
- Subsidios directos

De estos, los métodos de financiamiento en base al mercado y los contratos de servicio son en los que tienen un mayor potencial de ampliar el acceso a la tecnología de energía renovable entre la población rural. La energía renovable para el bombeo de agua también ofrece la posibilidad de nuevas e importantes actividades comerciales en áreas rurales al crear trabajos a través de ventas y servicios en la localidad.

En la mayoría de los países desarrollados, así como en aquellos menos desarrollados, las tecnologías de energía renovable todavía deben apreciarse como productos de consumo que pueden financiarse como cualquier automóvil o máquina lavadora. Sin embargo, hay algunas

excepciones notables en unos cuantos países, como la República Dominicana, que están estableciendo oportunidades creativas para la disseminación de tecnologías de renovables.

Las ventas de tecnologías de renovables, especialmente la fotovoltaica, en regiones rurales de países menos desarrollados suceden a cuatro diferentes niveles, como se muestra en la pirámide de la Figura 44. En la cima de la pirámide se encuentran las pocas familias rurales relativamente prósperas que pueden pagar de contado el alto costo inicial de un sistema de energía renovable. Le siguen muchos más consumidores que podrían adquirir un sistema de energía renovable si se les dieran razonables términos de crédito. La Figura 44 también muestra que aún hay más personas que podrían pagar un sencillo pago por servicio de energía bajo un contrato de servicio o de arrendamiento. Por último, están las familias más pobres que sencillamente están tratando de sobrevivir y tienen otros asuntos más apremiantes, como vivienda digna y agua limpia, que probablemente no estaría dispuesta a participar en ninguna forma de electrificación con renovables, a no ser que se les subsidie directamente por una organización de desarrollo. El porcentaje exacto de personas que caben dentro de cada una de estas categorías varía ampliamente de país en país.

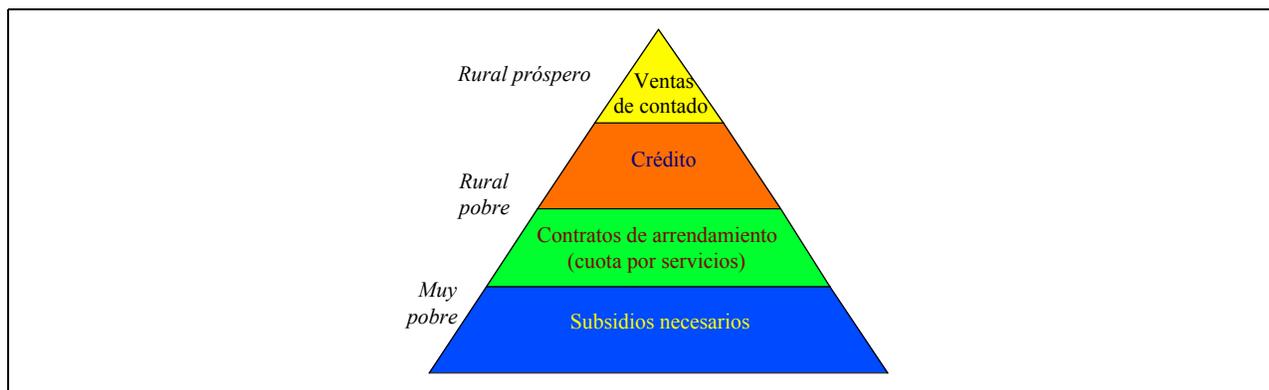


Figura 44. Pirámide de métodos de ventas de energía renovable a nivel institucional

Ventas al contado

Un buen número de sistemas de energía renovable se venden directamente al contado por todo el mundo. Típicamente esta es la única forma de disponible en muchos países donde no hay términos razonables de crédito. La mayoría de los distribuidores solares son pequeños, de empresas familiares y emprendedoras y que además no pueden costear el financiamiento a los consumidores, además sólo tienen acceso a los términos de crédito de sus proveedores, por tanto sólo les permite hacer ventas de contado. Obviamente, las ventas de contado se restringen a sólo los consumidores rurales de mejor posición económica quienes sí pueden pagar un sistema de energía renovable de inmediato.

Financiamiento a los consumidores

Uno de los más importantes avances del siglo veinte ha sido el desarrollo del crédito para consumidores. El financiamiento a consumidores es una forma común de incrementar las ventas de productos de consumo en todo el mundo. Esto ha permitido que naciones desarrolladas puedan ampliar números de habitantes dueños de sus propias viviendas, automóviles y aparatos que la persona común no podría adquirir de inmediato. Desafortunadamente, los bancos comerciales y los vendedores raramente dan financiamiento para la adquisición de productos de consumo para los habitantes de zonas rurales en los países en desarrollo, y cuando se da el caso, es a muy altos intereses. Se podrían instalar muchos sistemas de energía renovable si los consumidores contaran con financiamiento disponible. Esto podría permitir el crecimiento económico en áreas rurales. Desafortunadamente, no hay mecanismos de financiamiento en la mayoría de los países para la adquisición de energía renovable bajo la protección de códigos y estándares de productos e instalaciones, después de las ventas y garantías.

El financiamiento debe desarrollarse a tasas de interés competitivas y debe evitarse un desbalance de vencimientos de préstamos y subpréstamos, para hacer del financiamiento un negocio permisible. Los procedimientos deben ser lo más sencillo posible y permitir un rápido pago cuando se trata con habitantes rurales que están desacostumbrados a los conceptos de financiamiento. Es importante tener en paralelo un monitoreo de cumplimiento de pagos, que permitirá auditorías a los usuarios, auditorías de rendimiento y cuestionarios de satisfacción de los consumidores. De esta manera, el progreso del programa de financiamiento puede seguirse en tiempo real y pueden hacerse los cambios necesarios antes de que el programa entre en problemas.

Fondos de crédito revolvente

Un fondo de crédito revolvente se inicia con un capital semilla que le permita a las familias adquirir sistemas domésticos de energía solar. A medida que se hacen los pagos, el fondo se recupera con pagos mensuales que incluyen un interés. A medida que crece el fondo, más familias pueden incluirse para extender el número de sistemas financiados. Un programa establecido para este tipo de diseminación de renovables debe intentar usar un método de desarrollo integral, dando un completo apoyo institucional que incluya a las empresas de servicios, capacitación técnica y mecanismos de financiamiento.

Crédito bancario local

Otro modelo de financiamiento que se ha implementado para sistemas de energía renovable es por medio de bancos comerciales convencionales, típicamente los rurales. La dificultad para hacer que los bancos comerciales otorguen financiamiento a los sistemas fotovoltaicos es que la tecnología es relativamente desconocida y representa un nuevo concepto para los bancos. El

financiamiento de la banca comercial podría tener éxito en sistemas de renovables si pueden seguirse los siguientes pasos.

- El personal del banco se familiariza con los sistemas de energía renovable.
- Los sistemas de renovables se hacen sujetos de crédito bancario.
- Los prestatarios o cuentahabientes tienen acceso conveniente al banco.
- Los procedimientos de solicitud de préstamos son sencillos.
- Los requisitos de aval son razonables (e.g., el equipo se queda como aval).
- El calendario de pagos es flexible y complementa el flujo de ingresos del prestatario.

Arrendamiento

Otro método que se ha implementado para la diseminación de renovables en regiones rurales es el modelo de sistemas bajo arrendamiento. La idea es hacer los sistemas domésticos de energía renovable más al alcance de la población rural, eliminando la necesidad de un pago en adelante, bajando los pagos mensuales y reduciendo el compromiso económico del usuario a un sencillo contrato de arrendamiento mensual para el servicio de energía.

Crédito del distribuidor

Los distribuidores que venden sistemas de energía renovable a veces pueden ofrecer crédito a sus clientes. Cuando un distribuidor proporciona financiamiento al consumidor, obtiene una segunda fuente de ingresos en forma de intereses. La dificultad para la mayoría de los distribuidores es que por lo general son empresas pequeñas familiares y de emprendedores con acceso limitado a créditos que podrían pasarlo a sus clientes.

Subsidios

Con frecuencia, los subsidios mismos están malamente aplicados y diseñados por los planificadores. Los subsidios para las tecnologías de energía renovable que no crean ninguna infraestructura para el mantenimiento de sistemas o que no crean una infraestructura de fondo son ampliamente inútiles. Si se van a proporcionar subsidios, estos deben hacerse con la visión de establecer un futuro sustentable (i.e., “subsidios inteligentes”). Los subsidios deben ser capaces de soportar las presiones de reducción de precios en la tecnología; no obstante, no deben alterar la competencia proporcionando subsidios a una sola entidad. Los subsidios deben ser neutrales a la tecnología y a los proveedores.

Los subsidios se aprovechan mejor si dan financiamiento a los resultados y no a los costos de la inversión. Los subsidios al capital de inversión, incentivan la instalación de sistemas, pero no su utilización a largo plazo. Por ejemplo, no hay razón para que el subsidio para el bombeo de agua con energía renovable no pueda implementarse de tal forma que permita un esquema de *pago*

por servicios. Esto ayudaría a que los sistemas se mantengan en operación a largo plazo a la vez que se establece una base sólida para el abastecimiento y servicio local.

Así mismo, los subsidios deben usarse para asegurar que se satisfacen las necesidades de las comunidades rurales, definidas por las propias comunidades. Los participantes deben seleccionarse adecuadamente y deben tener un interés genuino en el servicio proporcionado, ya sea agua, electricidad o cualquier otra cosa.

Conclusiones

Para que los sistemas de bombeo de agua con energía renovable sean una solución viable y sustentable en aplicaciones de poblaciones remotas, la intervención de la tecnología debe estar acompañada de una estructura institucional adecuada y manejable.

Las lecciones más importantes que se han aprendido de las experiencias exitosas con la energía renovable han sido:

- El apoyo local de la comunidad y su capacitación es crucial.
- Para todos los proyectos con energía renovable es necesaria una planeación a largo plazo.
- Las responsabilidades y propiedad de los sistemas deben establecerse tempranamente.
- Para la supervivencia a largo plazo del sistema, el mantenimiento es crítico.
- Las organizaciones ejecutoras de proyectos deben luchar para trabajar con la industria para realizar instalaciones, fortaleciendo así a la industria local a la vez que se desarrolla una infraestructura para el mantenimiento de los sistemas.

Deben incluirse acciones para dar mantenimiento preventivo durante la planeación del proyecto desde el inicio mismo. Las actividades de mantenimiento con frecuencia pueden pagarse con los ingresos generados de los usuarios locales. Sin embargo, la falta de atención a los aspectos institucionales con frecuencia lleva a un inadecuado mantenimiento del sistema y causa una eventual degradación del sistema hasta que llega a fallar por completo.

Para evitar descomposturas, los sistemas de bombeo de agua con energía renovable deben ser de un tamaño realista y deben contar con controles institucionales adecuados desde su concepción. Los planificadores deben anticipar el crecimiento del consumo del agua, incluir una estructura tarifaria realista para el consumo de agua y medios para satisfacer las necesidades futuras de mantenimiento. Sólo así los sistemas de bombeo de agua con energía renovable podrán dar un servicio confiable y duradero a los usuarios. El bombeo de agua con energía solar es una de las más antiguas y sencillas aplicaciones de la tecnología, con una adecuada atención a los aspectos institucionales, estos sistemas podrían dar muchos años de servicio confiable.



- Almanza Salgado R y Muñoz Gutierrez F. Ingeniería de la Energía Solar. El Colegio Nacional, Primera Edición, México, 1994.
- Barlow R., McNelis B., Derrick A., Solar Pumping: An Introduction and Update on the Technology, Performance, Costs and Economics (Bombeo Solar: Introducción y Actualización de Tecnología, Desempeño y Costos). World Bank Intermediate Technology Publications. Artículo N° 168, Washington, D.C., 1993.
- Bueche F. J., Introducción a la Física para Científicos e Ingenieros, Ed. Mc GRAW HILL, Tercera Edición, New York, 1980.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes (Ingeniería solar de procesos térmicos). WILEY INTERSCIENCE, Segunda Edición, New York, 1991.
- Foster, R. E., G. Cisneros, C. Hanley, "Mexican Renewable Energy Development: Creating New Markets," Sustainable Applications for Tropical Island States Conference 1999, Caribbean Solar Energy Society, San Juan, Puerto Rico, Agosto 25-27, 1999.
- Foster, R. E., Photovoltaic Market Development and Barriers in Mexico, Tesis de Maestría, Graduate School, New Mexico State University, Las Cruces, New Mexico, Diciembre, 1998, 206 p.
- Lorenzo E. Electricidad Solar: Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos. Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid. Ed. PROGNSA, Primera Edición, 1994.
- Risser V. Stand-Alone Photovoltaics Systems: A Handbook Recommended Design Practices (Sistemas Fotovoltaicos Aislados: Manual de Prácticas Recomendadas en el Diseño), Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1995.
- Sandia National Laboratories, "The Renewable Energy Program in Mexico," Quarterly Highlights of Sandia's Photovoltaics Program, Volumen 4, 1998, Albuquerque, Nuevo Mexico, Abril, 1999.
- Shepperd W., Lisa and Elizabeth Richards, Energia Solar Fotovoltaica para Proyectos de Desarrollo, Reporte SAND93-1642. Sandia National Laboratories, Albuquerque NM, 1993.
- Thomas M. G. Water pumping: The Solar Alternative (Bombeo Solar: La Alternativa Solar), Reporte SAND87-0804. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1994.
- Zubicaray V. Bombas: Teoría, Diseño y Aplicaciones, Ed. LIMUSA, Segunda Edición; México, 1996.



Apéndice A: Insolación global en México

Tabla A-1. Insolación global media inclinación a a latitud en México en kWh/m²-Día

Fuentes: Actualización de los Mapas de Irradiación Global solar en la República Mexicana (R. Almanza S. ,E. Cajjal R., J. Barrientos A. 1997) Reportes de insolación de México. Southwest Technology Development Institute, NMSU, 1999

Estado	Ciudad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Min	Max	Med
Aguascalientes	Aguascalientes	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	6.3	6.1	5.9	5.7	5.1	4.8	4.0	4.0	7.2	5.6
Baja CaliforniaSur	La Paz	4.4	5.5	6.0	6.6	6.5	6.6	6.3	6.2	5.9	5.8	4.9	4.2	4.2	6.6	5.7
Baja California	Mexicali	4.1	4.4	5.0	5.6	6.6	7.3	7.0	6.1	6.1	5.5	4.5	3.9	3.9	7.3	5.5
Baja California	San Javier	4.2	4.6	5.3	6.2	6.5	7.1	6.4	6.3	6.4	5.1	4.7	3.7	3.7	7.1	5.5
Baja California Sur	S. José del Cabo	5.0	5.6	5.8	5.9	6.9	6.1	5.8	6.2	5.8	5.8	5.2	4.4	4.5	6.3	5.7
Campeche	Campeche	4.8	5.7	6.0	5.3	5.4	4.9	4.9	5.3	5.2	5.4	5.0	4.3	4.4	6.0	5.2
Chiapas	Arriaga	5.1	5.4	5.5	5.9	5.6	5.2	5.9	5.5	5.1	5.3	5.1	4.7	4.7	5.9	5.4
Chiapas	Juan Aldama	4.4	5.1	4.9	4.5	4.5	4.1	4.4	4.5	4.1	4.3	4.4	4.2	4.1	5.1	4.5
Chiapas	San Cristóbal	4.0	4.3	4.5	4.5	4.8	4.7	5.4	5.3	4.6	4.2	3.9	3.7	3.7	5.4	4.5
Chiapas	Tapachula	5.4	4.9	4.8	4.6	4.7	4.7	5.2	5.1	4.6	4.1	4.3	4.1	4.1	5.4	4.7
Chiapas	Tuxtla Gutiérrez	3.8	4.4	4.6	4.8	5.3	5.1	5.4	5.3	4.9	4.4	4.1	3.7	3.7	5.4	4.7
Chihuahua	Chihuahua	5.8	6.4	6.8	6.9	6.9	6.4	6.4	6.5	6.8	6.8	6.0	5.2	5.3	8.9	5.9
Chihuahua	Guachochi	3.3	3.5	3.9	4.4	5.1	5.3	5.4	5.6	5.7	5.1	4.9	4.4	3.3	6.9	6.4
Chihuahua	Cd. Juárez	6.0	7.2	7.3	7.3	6.9	6.5	6.3	6.5	6.8	7.4	6.6	5.9	5.9	7.4	6.7
Coahuila	Piedras Negras	3.1	3.6	4.2	4.5	4.8	6.0	6.7	6.3	4.9	4.1	3.3	2.9	2.9	6.7	4.5
Coahuila	Saltillo	3.8	4.2	4.8	5.1	5.6	5.9	5.9	5.6	5.2	4.4	3.6	3.3	3.3	5.9	4.8
Colima	Colima	4.4	5.1	5.3	5.8	6.0	5.2	4.9	5.0	4.6	4.4	4.4	3.9	3.9	6.0	4.9
D.F.	Tacubaya	5.4	6.0	6.4	5.9	5.3	5.1	4.5	4.9	4.5	4.8	5.2	5.2	4.5	6.4	5.3
Durango	Durango	4.4	5.4	6.5	7.0	7.5	6.8	6.0	5.6	5.7	5.1	4.8	3.9	3.9	7.5	5.7
Guanajuato	Guanajuato	4.4	5.1	6.1	6.3	6.6	6.0	6.0	5.9	5.8	5.2	4.8	4.6	4.4	6.6	5.6
Guerrero	Acapulco	4.8	5.3	6.1	5.9	5.6	5.1	5.3	5.4	4.9	5.2	5.0	4.7	4.7	6.1	5.3
Guerrero	Aguas Blancas	5.8	5.9	6.0	5.8	5.8	5.4	5.6	5.8	5.5	5.6	5.5	5.5	5.4	6.0	5.7
Guerrero	Chilpancingo	4.1	4.5	4.9	5.2	5.2	5.2	5.1	5.1	4.7	4.4	4.1	3.8	3.8	5.2	4.7
Hidalgo	Pachuca	4.6	5.1	5.6	6.8	6.0	5.7	5.9	5.8	5.3	4.9	4.6	4.2	4.2	6.8	5.4
Jalisco	Colotlán	4.6	5.7	6.5	7.5	8.2	6.6	5.8	5.6	5.8	5.3	4.9	4.1	4.1	8.2	5.9
Jalisco	Guadalajara	4.6	5.5	6.3	7.4	7.7	5.9	5.3	5.3	5.2	4.9	4.8	4.0	4.0	7.7	5.6
Jalisco	L. de Moreno	4.5	5.3	6.1	6.7	7.2	6.1	5.8	5.6	5.5	5.0	4.7	4.0	4.0	7.2	5.5
Jalisco	Puerto Vallarta	5.2	5.7	6.0	5.8	5.7	5.5	5.6	5.7	5.5	5.6	5.2	4.7	4.7	6.0	5.5
México	Chapingo	4.5	5.1	5.6	5.8	5.9	5.4	5.2	5.2	5.0	4.7	4.6	3.9	3.9	5.9	5.1
Michoacán	Morelia	4.2	4.9	5.5	5.8	5.9	5.2	5.0	5.1	4.9	4.6	4.3	3.7	3.7	5.9	4.9
Nayarit	Tepic	3.9	4.3	4.8	5.5	6.1	5.3	4.9	5.3	4.4	4.4	4.0	4.8	3.9	6.1	4.8
Nuevo León	Monterrey	3.2	3.6	4.1	4.3	4.8	5.5	6.1	5.6	5.0	3.8	3.3	3.0	3.0	6.1	4.4
Oaxaca	Oaxaca	4.9	5.7	5.8	5.5	6.0	5.4	5.9	5.6	5.0	4.9	4.8	4.4	4.4	6.0	5.3
Oaxaca	Salina Cruz	5.4	6.3	6.6	6.4	6.1	5.0	5.6	5.9	5.2	5.9	5.7	5.2	5.0	6.6	5.8
Puebla	Puebla	4.9	5.5	6.2	6.4	6.1	5.7	5.8	5.8	5.2	5.0	4.7	4.4	4.4	6.4	5.5
Querétaro	Querétaro	5.0	5.7	6.4	6.8	6.9	6.4	6.4	6.4	6.3	5.4	5.0	4.4	4.4	6.9	5.9
QuintanaRoo	Chetumal	3.9	4.7	5.4	5.7	5.3	4.7	4.9	5.0	4.5	4.4	4.0	3.7	3.7	5.7	4.7
QuintanaRoo	Cozumel	3.9	4.6	5.3	5.7	5.2	4.8	4.9	4.9	4.6	4.4	4.0	3.8	3.8	5.7	4.7
San Luis Potosí	Río Verde	3.6	4.0	4.6	4.9	5.4	5.6	5.8	5.8	5.1	4.3	3.7	3.3	3.3	5.8	4.7
San Luis Potosí	San Luis Potosí	4.3	5.3	5.8	6.4	6.3	6.1	6.4	6.0	5.5	4.7	4.2	3.7	3.7	6.4	5.4
Sinaloa	Culiacán	3.6	4.2	4.8	5.4	6.2	6.2	5.4	5.1	5.2	4.6	4.2	3.4	3.4	6.2	4.9
Sinaloa	Los Mochis	4.9	5.4	5.8	5.9	5.8	5.8	5.3	5.5	5.5	5.8	4.9	4.3	4.3	5.9	5.4
Sinaloa	Mazatlan	3.9	4.8	5.4	5.7	5.7	5.6	4.8	4.9	4.7	5.0	4.5	3.9	3.9	5.7	4.9
Sonora	Ciudad Obregón	5.8	6.4	6.8	6.9	6.9	6.7	6.4	6.5	6.8	7.3	6.0	5.2	5.3	7.26	6.5
Sonora	Guaymas	4.5	5.7	6.5	7.2	7.3	6.8	5.9	5.8	6.3	5.9	5.1	5.6	4.5	7.3	6.0
Sonora	Hermosillo	4.0	4.6	5.4	6.6	8.3	8.6	6.9	6.6	6.7	6.0	4.7	3.9	3.9	8.6	6.0
Tamaulipas	Soto la Marina	3.4	4.2	4.9	4.9	5.1	5.3	5.4	5.4	4.9	4.6	3.7	3.2	3.2	5.4	4.6
Tamaulipas	Tampico	3.3	4.1	4.7	6.4	5.0	4.9	4.9	4.9	4.6	4.6	3.7	3.2	3.2	6.4	4.5
Tlaxcala	Tlaxcala	4.6	5.1	5.5	5.4	5.6	5.2	5.3	5.2	5.1	4.9	4.7	4.0	4.0	5.6	5.1
Veracruz	Córdoba	3.1	3.3	3.6	3.8	4.1	4.4	4.6	4.5	4.1	3.5	3.1	2.8	2.8	4.6	3.7
Veracruz	Jalapa	3.2	3.5	3.8	4.3	4.6	4.4	4.9	5.0	4.4	3.7	3.3	3.0	3.0	5.0	4.0
Veracruz	Veracruz	3.7	4.5	4.9	5.1	5.1	4.8	4.7	5.1	4.6	4.8	4.1	3.6	3.6	5.1	4.6
Yucatán	Mérida	3.7	4.0	4.6	5.2	5.7	5.5	5.7	5.5	5.0	4.2	3.8	3.4	3.4	5.7	4.7
Yucatán	Progreso	4.1	4.9	5.4	5.5	5.3	5.1	5.3	5.3	5.0	5.0	4.4	4.0	4.0	5.5	4.9
Yucatán	Valladolid	3.7	4.1	3.1	5.4	5.7	5.3	5.4	5.4	4.9	4.2	3.8	3.5	3.1	5.7	4.5
Zacatecas	Zacatecas	4.9	5.7	6.6	7.5	7.8	6.2	6.2	5.9	5.4	4.8	4.8	4.1	4.1	7.8	5.8



Apéndice B: Factores de pérdida por fricción

Tabla B-1. Factores de pérdida por fricción en PVC rígido

Factores aproximados, en m/100m (porcentajes). Tubería PVC rígida y nueva.
Los flujos son en litros por segundos.

TAMAÑO DE TUBERÍA									
Flujo	.5"	.75"	1"	1.25"	1.5"	2"	2.5"	3"	4"
.10	4.20	1	.25	..08					
.15	8.80	2.20	.53	.17	.07				
.20	15	3.70	.90	.28	.12				
.25	22	5.50	1.35	.44	.18				
.30	31	7.80	1.90	.60	.25				
.35	41	10	2.45	.80	.34				
.40	53	13	3.10	1	.43				
.45	66	16.30	4	1.25	.54	.13			
.50		19	4.80	1.50	.65	.16			
.55		23.50	5.60	1.80	.78	.19			
.60		27.50	6.60	2.10	.90	.22			
.65		32	7.80	1.40	1.04	.25			
.70		36	8.70	2.70	1.19	.28			
.75		41	9.90	3.10	1.32	.33	.10		
.80		45	11	3.50	1050	.37	.12		
.85		52	12.50	4	1.70	.41	.14		
.90		57	14	4.50	1.90	.45	.15		
.95		.63	15	4.90	2.10	.50	.17		
1			16.50	5.40	2.25	.55	.18	.08	
1.05			18	5.80	2.50	.60	.20	.09	
1.10			19.50	6.30	2.70	.67	.22	.10	
1.15			21.50	6.90	2.95	.71	.24	.10	
1.20			23	7.30	3.20	.78	.26	.11	
1.30			26.50	8.60	3.75	.90	.29	.13	
1.40			30	10	4.25	1	.34	.15	
1.50			35	11.20	4.90	1.15	.39	.17	
1.60			39	12.50	5.50	1.30	.43	.19	
1.70			44	14.20	6.05	1.45	.49	.21	
1.80			49	15.90	6.90	1.60	.54	.24	
1.90			55	17.40	7.50	1.80	.60	.26	
2			60	19	8	2	.66	.28	
2.20				22.50	9.70	2.35	.79	.34	
2.40				26.80	11.50	2.75	.90	.40	
2.60				31	13.30	3.20	1.05	.45	
2.80				35.10	15.20	3.70	1.20	.52	
3				40	17	4.20	1.36	.60	
3.20				45	19.30	4.70	1.52	.68	
3.40				50	21.90	5.25	1.70	.75	
3.60				56	24	5.80	1.90	.84	.20
3.80				62	26	6.30	2.10	.90	.22
4				69	29	7	2.30	1	.24
4.50					36	8.80	2.80	1.20	.30
5					44	10.50	3.50	1.50	.37
5.50					62	12.50	4.20	1.75	.44
6						14.70	4.90	2.10	.52
6.50						17	5.60	2.40	.60
7						19.50	6.50	2.80	.70

Tabla B-2. Factores de pérdida por fricción en acero galvanizado

Factores aproximados, en m/100 (porcentajes). Tubería nueva.
Los flujos son en litros por segundo.

TAMAÑO DE TUBERÍA									
Flujo	.5"	.75"	1"	1.25"	1.5"	2"	2.5"	3"	4"
.10	5.90	1.58	.38	.12					
.15	12.25	3.40	.82	.26					
.20	21.45	5.65	1.40	.44	.19				
.25	31.65	8.50	2.10	.68	.28				
.30	44.91	11.90	2.90	.92	.40				
.35	58.20	15.80	3.80	1.20	.52				
.40	75.50	19.90	4.80	1.55	.67				
.45	91.90	25	6	1.93	.84				
.50		30	7.30	2.35	1	.25			
.55		36	8.70	2.75	1.20	.30			
.60		42	10.20	3.25	1.40	.35			
.65		48	11.90	3.80	1.63	.40			
.70		55	13.6	4.35	1.82	.46			
.75		63	15.40	4.90	2.15	.52	.17		
.80			17.40	5.55	2.40	.59	.19		
.85			19.40	6.15	2.65	.68	.21		
.90			21.80	6.90	2.90	.74	.23		
.95			24	7.50	3.25	.82	.28		
1			26.20	8.20	3.60	.80	.28	.12	
1.05			28.50	9	3.90	.97	.31	.13	
1.10			31	9.80	4.20	1.05	.34	.15	
1.15			34.60	10.60	4.80	1.15	.37	.16	
1.20			36	11.50	5	1.25	.39	.17	
1.30			42.50	13.30	5.70	1.45	.45	.20	
1.40			48	15.30	6.60	1.65	.52	.23	
1.50			55	17.50	7.65	1.90	.59	.26	
1.60			62	19.50	8.45	2.10	.67	.29	
1.70			69	22	9.50	2.35	.75	.33	
1.80				24.20	10.50	2.60	.82	.36	
1.90				24.50	11.70	2.85	.90	.40	
2				29.50	12.80	3.20	1	.44	
2.20				35	15.30	3.80	1.20	.52	
2.40				42	17.90	4.45	1.40	.61	
2.60				48.50	20.50	5.15	1.60	.71	.17
2.80				55	24	5.95	1.85	.82	.20
3				62.50	26.70	6.70	2.10	.92	.22
3.20					30	7.60	2.35	1.02	.25
3.40					34	8.40	2.65	1.15	.28
3.60					38	9.40	2.95	1.28	.32
3.80					41	10.30	3.25	1.42	.35
4					45	11.20	3.55	1.55	.38
4.50					56	14	4.45	1.95	.46
5						17	5.45	2.25	.56
5.50						20	6.50	2.80	.68
6						24	7.50	3.35	.80
6.50						28	8.85	3.90	.92
7						32	10	4.45	1.05



Apéndice C: Rangos de operación de bombas FV

Tabla C-1. Rangos de operación de algunas bombas FV

TIPO	M ARCA	MODELO	POTENCIA (W)	CARGA DINAM ICA (m)	VOLTAJE DE OPERACION (V)	
B O M B A S S U M E R G I B L E S	SOLARJACK	SCS 2-280	200-600	24-97	30-45	
		SCS 3-160	169-467	18-58	30-45	
		SCS 3-200	190-520	21-70	30-45	
		SCS 4-140	190-491	9-55	30-45	
		SCS 5-95	160-400	3-37	30-45	
		SCS 4-110	150-406	11-46	30-45	
		SCS 6-140	135-655	9-52	30-60	
		SCS 7.7-116	200-598	9-40	30-45	
		SCS 4.5-260	124-613	6-70	30-60	
		SCS 9-100	149-654	3-35	30-60	
	CENTRIFUGAS	SCS 4-325	531-1308	53-134	75-105	
		SCS 5-250	464-1108	27-8	90-120	
		SCS 5.7-160	325-807	18-70	90-120	
		SCS 6-185	404-918	18-70	90-120	
		SCS 10-230	466-1272	33-85	75-105	
		SCS 11-210	430-1371	18-79	75-120	
		SCS 14-160	304-1213	15-55	60-105	
		SCS 18-160	611-1455	18-59	90-120	
		SCS 40-70	351-1343	8-30	75-120	
		SDS D-128	35-	0-35	12-30	
		SDS D-228	35-	0-7	12-30	
		SDS Q-128	35-	0-30	12-30	
		GRUNDFOS	SP 1A-28	380-800	100-200	65
			SP 5A-7	160-500	2-50	65
			SPI6-2	150-600	1-15	65
	SP 8A-5		150-450	2-28	65	
	SP 3A-10		200-500	30-70	65	
	SP 2A-15		300-700	60-120	65	
	SP 1.5A-21		400-600	80-120	65	
	SP 3A-2		40-120	5-13	90	
	SP 2A-4		50-140	10-25	90	
	SP 1A-9		70-145	20-40	90	
	SP 3A-3		60-140	10-20	75	
	SP 3A-2		40-120	5-15	75	
	SP 1A-9		50-120	15-35	75	
	SP 3A-2		35-130	5-15	60	
	SP 2A-4		50-110	10-20	60	
	SPIA-6	60-130	5-15	45		
	A.Y. McDONALD	2110120DJ	170-1190	38	34-90	
		211012DK	170-1190	32-149	34-90	
		211009DP	160-1190	18-97	34-90	
		211008D	170-1190	17-88	34-90	
		211003DS	100-1600		24-100	
		211002DT	100-160		24-100	
	SHURFLO	9325-043-101			24	
		3700 SERIES			AC	
		5281	200-400	46-137	48	
		5226	200-400	8-76	48	
		5230	280-400	25-38	48	
	SOLARJACK CENTRIFUGAS	SC 35-30-1	163-904	12-40	45-75	
SC-7		300-360	0-70	12		
JACK	SJDA-16	680-1700				
	SJDB-20	900-2500				
	SJDB-24	900-2500				
SHURFLO	2088 SERIES			12-24 DC , 115 AC		
	800 SERIES			12		
A.Y. M cDONALD	150307DJ	35-140	0-45	18-36		
	1500 SERIES	120-1300		12-90		
	810202 DJ	85-150	9-15	14-18		
	150305 DS	500	4-5	18-36		
	150307 DS	700	6-27	18-36		
	150309 DS	900	8-30	18-36		
	150813 DS	1300	12-49	42-84		
	150305 DJ	500	8-38	18-36		
	150307 DJ	700	11-41	18-36		
	150309 DJ	900	11-53	18-36		
	150813 DJ	1300	15-53	42-200		
	820305 DS	500	3-18	18-36		
	820307 DS	700	5-21	18-36		
	820309 DS	900	6.1-24	18-36		
	820813 DS	1300	8-30	42-84		
	820-309 DS1	900	14-30	24-36		
	94011DK	300		12		
	940211 DK	300		24		
	940215 DK	400		24		
	940311DK	900		36		
	B O M B A S S U P E R F I C I A L E S					



Apéndice D: Tabla de costos aproximados de sistema FV de bombeo y tablas de factores de valor presente

Tabla D-1. Costos aproximados para sistemas de bombeo fotovoltaico en México

Insolación (Horas Solares Pico)						Costo Aproximado del Sistema (*) (Dólares Estadunidenses)							
3	4	5	6	7	8								
20,000	26,700	33,300	40,000	46,700	53,300	\$8,300	\$9,600	\$11,400	\$13,600	\$16,300	\$16,500	**	**
13,500	18,000	22,500	27,000	31,500	36,000	\$8,200	\$8,900	\$9,300	\$12,400	\$13,400	\$13,500	\$17,200	**
10,000	13,300	16,700	20,000	23,300	26,700	\$7,000	\$8,400	\$8,300	\$10,300	\$10,600	\$12,400	\$16,500	\$17,800
6,500	8,700	10,800	13,000	15,200	17,300	\$6,700	\$7,000	\$8,100	\$8,800	\$9,800	\$11,600	\$13,500	\$16,400
5,000	6,700	8,400	10,000	11,700	13,300	\$6,500	\$6,700	\$7,100	\$8,100	\$8,700	\$10,500	\$12,800	\$14,500
4,000	5,300	6,600	8,000	9,300	10,700	\$6,100	\$6,300	\$6,800	\$7,900	\$8,000	\$9,400	\$11,800	\$12,700
2,500	3,300	4,200	5,000	5,800	6,700	\$3,600	\$3,700	\$5,200	\$6,500	\$7,200	\$8,700	\$10,500	\$11,300
2,000	2,700	3,400	4,000	4,800	5,400	\$2,800	\$3,300	\$4,300	\$5,600	\$6,500	\$8,500	\$10,300	\$10,800
1,500	2,000	2,500	3,000	3,500	4,000	\$2,600	\$2,800	\$3,900	\$4,400	\$4,700	\$5,500	\$7,000	\$9,800
1,000	1,300	1,700	2,000	2,300	2,700	\$2,100	\$2,400	\$3,200	\$3,500	\$3,600	\$4,100	\$5,000	\$6,200
500	700	800	1,000	1,200	1,300	\$1,600	\$1,800	\$2,300	\$2,500	\$2,600	\$3,000	\$3,400	\$3,300
Rendimiento (litros / día)						5	10	15	20	30	40	50	60
						Carga Dinámica Total (Metros)							

NOTAS:

(*) Incluye instalación profesional e impuestos. No incluye pólizas de garantía.

(**) No se identificaron bombas para este tamaño de aplicación.

Tabla D-2. FVP factor de valor presente de un pago con interés

Años	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	15%
1	0.9901	0.9804	0.9709	0.9615	0.9524	0.9434	0.9346	0.9259	0.9174	0.9091	0.9009	0.8929	0.8850	0.8772	0.8696
2	0.9803	0.9612	0.9426	0.9246	0.9070	0.8900	0.8734	0.8573	0.8417	0.8264	0.8116	0.7972	0.7831	0.7695	0.7561
3	0.9706	0.9423	0.8890	0.8890	0.8638	0.8396	0.8163	0.7938	0.7722	0.7513	0.7312	0.7118	0.6931	0.6750	0.6575
4	0.9610	0.9238	0.8548	0.8548	0.8227	0.7921	0.7629	0.7350	0.7084	0.6830	0.6587	0.6355	0.6133	0.5921	0.5718
5	0.9515	0.9057	0.8219	0.8219	0.7835	0.7473	0.7130	0.6806	0.6499	0.6209	0.5935	0.5674	0.5428	0.5194	0.4972
6	0.9420	0.8880	0.7903	0.7903	0.7462	0.7050	0.6663	0.6302	0.5963	0.5645	0.5346	0.5066	0.4803	0.4556	0.4323
7	0.9327	0.8706	0.7599	0.7599	0.7107	0.6651	0.6227	0.5835	0.5470	0.5132	0.4817	0.4523	0.4251	0.3996	0.3759
8	0.9235	0.8535	0.7307	0.7307	0.6768	0.6274	0.5820	0.5403	0.5019	0.4665	0.4339	0.4039	0.3762	0.3506	0.3269
9	0.9143	0.8368	0.7026	0.7026	0.6446	0.5919	0.5439	0.5002	0.4604	0.4241	0.3909	0.3606	0.3329	0.3075	0.2843
10	0.9053	0.8203	0.6756	0.6756	0.6139	0.5584	0.5083	0.4632	0.4224	0.3855	0.3522	0.3220	0.2946	0.2697	0.2472
11	0.8963	0.8043	0.6496	0.6496	0.5847	0.5268	0.4751	0.4289	0.3875	0.3505	0.3173	0.2875	0.2607	0.2366	0.2149
12	0.8874	0.7885	0.6246	0.6246	0.5568	0.4970	0.4440	0.3971	0.3555	0.3186	0.2858	0.2567	0.2307	0.2076	0.1869
13	0.8787	0.7730	0.6006	0.6006	0.5303	0.4688	0.4150	0.3677	0.3262	0.2897	0.2575	0.2292	0.2042	0.1821	0.1625
14	0.8700	0.7579	0.5775	0.5775	0.5051	0.4423	0.3878	0.3405	0.2992	0.2633	0.2320	0.2046	0.1807	0.1597	0.1413
15	0.8613	0.7430	0.5553	0.5553	0.4810	0.4173	0.3624	0.3152	0.2745	0.2394	0.2090	0.1827	0.1599	0.1401	0.1229
16	0.8528	0.7284	0.5339	0.5339	0.4581	0.3936	0.3387	0.2919	0.2519	0.2176	0.1883	0.1631	0.1415	0.1229	0.1069
17	0.8444	0.7142	0.5134	0.5134	0.4363	0.3714	0.3166	0.2703	0.2311	0.1978	0.1696	0.1456	0.1252	0.1078	0.0929
18	0.8360	0.7002	0.4936	0.4936	0.4155	0.3503	0.2959	0.2502	0.2120	0.1799	0.1528	0.1300	0.1108	0.0946	0.0808
19	0.8277	0.6864	0.4746	0.4746	0.3957	0.3305	0.2765	0.2317	0.1945	0.1635	0.1377	0.1161	0.0981	0.0829	0.0703
20	0.8195	0.6730	0.4564	0.4564	0.3769	0.3118	0.2584	0.2145	0.1784	0.1486	0.1240	0.1037	0.0868	0.0728	0.0611
21	0.8114	0.6598	0.4388	0.4388	0.3589	0.2942	0.2415	0.1987	0.1637	0.1351	0.1117	0.0926	0.0768	0.0638	0.0531
22	0.8034	0.6468	0.4220	0.4220	0.3418	0.2775	0.2257	0.1839	0.1502	0.1228	0.1007	0.0826	0.0680	0.0560	0.0462
23	0.7954	0.6342	0.4057	0.4057	0.3256	0.2618	0.2109	0.1703	0.1378	0.1117	0.0907	0.0738	0.0601	0.0491	0.0402
24	0.7876	0.6217	0.3901	0.3901	0.3101	0.2470	0.1971	0.1577	0.1264	0.1015	0.0817	0.0659	0.0532	0.0431	0.0349
25	0.7798	0.6095	0.3751	0.3751	0.2953	0.2330	0.1842	0.1460	0.1160	0.0923	0.0736	0.0588	0.0471	0.0378	0.0304

Tabla D-3. FVPA Factor de Valor Presente de Pagos Anuales Fijos

Años	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%	11%	12%	13%	14%	15%
1	0.9901	0.9804	0.9709	0.9615	0.9524	0.9434	0.9346	0.9259	0.9174	0.9091	0.9009	0.8929	0.8850	0.8772	0.8696
2	1.9704	1.9416	1.9135	1.8861	1.8594	1.8334	1.8080	1.7833	1.7591	1.7355	1.7125	1.6901	1.6681	1.6467	1.6257
3	2.9410	2.8839	2.8286	2.7751	2.7232	2.6730	2.6243	2.5771	2.5313	2.4869	2.4437	2.4018	2.3612	2.3216	2.2832
4	3.9020	3.8077	3.7171	3.6299	3.5460	3.4651	3.3872	3.3121	3.2397	3.1699	3.1024	3.0373	2.9745	2.9137	2.8550
5	4.8534	4.7135	4.5797	4.4518	4.3295	4.2124	4.1002	3.9927	3.8897	3.7908	3.6959	3.6048	3.5172	3.4331	3.3522
6	5.7955	5.6014	5.4172	5.2421	5.0757	4.9173	4.7665	4.6229	4.4859	4.3553	4.2305	4.1114	3.9975	3.8887	3.7845
7	6.7282	6.4720	6.2303	6.0021	5.7864	5.5824	5.3893	5.2064	5.0330	4.8684	4.7122	4.5638	4.4226	4.2883	4.1604
8	7.6517	7.3255	7.0197	6.7327	6.4632	6.2098	5.9713	5.7466	5.5348	5.3349	5.1461	4.9676	4.7988	4.6389	4.4873
9	8.5660	8.1622	7.7861	7.4353	7.1078	6.8017	6.5152	6.2469	5.9952	5.7590	5.5370	5.3282	5.1317	4.9464	4.7716
10	9.4713	8.9826	8.5302	8.1109	7.7217	7.3601	7.0236	6.7101	6.4177	6.1446	5.8892	5.6502	5.4262	5.2161	5.0188
11	10.3676	9.7868	9.2526	8.7605	8.3064	7.8869	7.4987	7.1390	6.8052	6.4951	6.2065	5.9377	5.6869	5.4527	5.2337
12	11.2551	10.5753	9.9540	9.3851	8.8633	8.3838	7.9427	7.5361	7.1607	6.8137	6.4924	6.1944	5.9176	5.6603	5.4206
13	12.1337	11.3484	10.6350	9.9856	9.3936	8.8527	8.3577	7.9038	7.4869	7.1034	6.7499	6.4235	6.1218	5.8424	5.5831
14	13.0037	12.1062	11.2961	10.5631	9.8986	9.2950	8.7455	8.2442	7.7862	7.3667	6.9819	6.6282	6.3025	6.0021	5.7245
15	13.8651	12.8493	11.9379	11.1184	10.3797	9.7122	9.1079	8.5595	8.0607	7.6061	7.1909	6.8109	6.4624	6.1422	5.8474
16	14.7179	13.5777	12.5611	11.6523	10.8378	10.1059	9.4466	8.8514	8.3126	7.8237	7.3792	6.9740	6.6039	6.2651	5.9542
17	15.5623	14.2919	13.1661	12.1657	11.2741	10.4773	9.7632	9.1216	8.5436	8.0216	7.5488	7.1196	6.7291	6.3729	6.0472
18	16.3983	14.9920	13.7535	12.6593	11.6896	10.8276	10.0591	9.3719	8.7556	8.2014	7.7016	7.2497	6.8399	6.4674	6.1280
19	17.2260	15.6785	14.3238	13.1339	12.0853	11.1581	10.3356	9.6036	8.9501	8.3649	7.8393	7.3658	6.9380	6.5504	6.1982
20	18.0456	16.3514	14.8775	13.5903	12.4622	11.4699	10.5940	9.8181	9.1285	8.5136	7.9633	7.4694	7.0248	6.6231	6.2593
21	18.8570	17.0112	15.4150	14.0292	12.8212	11.7641	10.8355	10.0168	9.2922	8.6487	8.0751	7.5620	7.1016	6.6870	6.3125
22	19.6604	17.6580	15.9369	14.4511	13.1630	12.0416	11.0612	10.2007	9.4424	8.7715	8.1757	7.6446	7.1695	6.7429	6.3587
23	20.4558	18.2922	16.4436	14.8568	13.4886	12.3034	11.2722	10.3711	9.5802	8.8832	8.2664	7.7184	7.2297	6.7921	6.3988
24	21.2434	18.9139	16.9355	15.2470	13.7986	12.5504	11.4693	10.5288	9.7066	8.9847	8.3481	7.7843	7.2829	6.8351	6.4338
25	22.0232	19.5235	17.4131	15.6221	14.0939	12.7834	11.6536	10.6748	9.8226	9.0770	8.4217	7.8431	7.3300	6.8729	6.4641