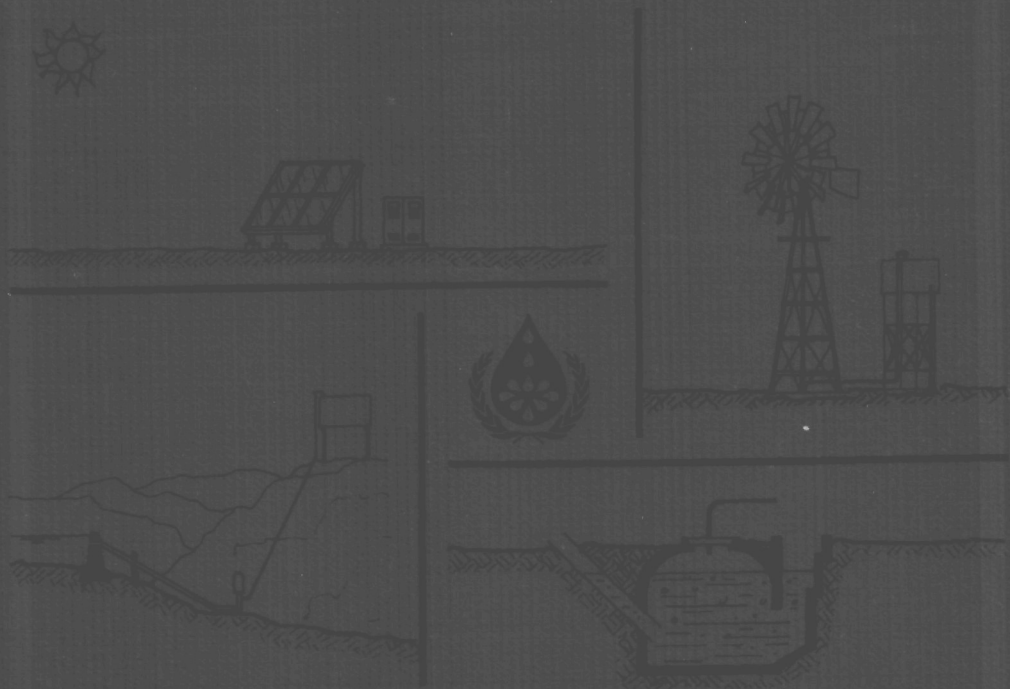




232.0 90FU

Fuentes Renovables de Energía para Sistemas de Abastecimiento de Agua



23

Serie Documentos Técnicos

232.0-90Fu-886g

**CINARA
CENTRO INTER-REGIONAL DE ABASTECIMIENTO Y REMOCION DE
AGUA**

CINARA, es una fundación sin ánimo de lucro, orientada a la investigación, el desarrollo y la transferencia organizada e integral de tecnología en el campo del abastecimiento de agua potable y de la remoción de agua. Su trabajo se dirige principalmente hacia el sector rural, el pequeño y mediano municipio y los asentamientos urbano-marginales, tradicionalmente los más desprotegidos en el cubrimiento de los servicios públicos.

En la fundación trabajan ingenieros conjuntamente con personal de las Ciencias Sociales y de las Ciencias Básicas, en un esfuerzo integrado con profesionales y técnicos de las instituciones cooperantes, los líderes del agua y las comunidades mismas preocupadas por el mejoramiento de sus condiciones sanitarias y las preservación de su medio ambiente.

CINARA mantiene un Convenio de Cooperación Académica e Investigativa con la Universidad del Valle y adelanta proyectos mediante convenios o contratos con organizaciones locales, nacionales e internacionales del sector de agua, considerado como un componente vital en un desarrollo fundamentado en el mejoramiento de la calidad de vida.

Para información adicional, dirigirse a:

CINARA
A.A. 25360
CALI, COLOMBIA, SUR AMERICA

IRC. International Water and Sanitation Centre

El IRC es una fundación independiente y sin ánimo de lucro que actúa como Centro Colaborante en Abastecimiento de Agua y Saneamiento Ambiental, en interrelación con el Gobierno de los Países Bajos, el PNUD, el Banco Mundial, la UNICEF y la OMS.

El IRC está al servicio de las miles de personas que dedican sus esfuerzos al mejoramiento de las condiciones sanitarias y apoya el desarrollo de organizaciones orientadas al cumplimiento de este objetivo.

Su radio de acción se extiende a entidades adscritas a la Organización de las Naciones Unidas por medio de convenios bilaterales, a instituciones del sector de agua y saneamiento y a organizaciones no gubernamentales en los países menos desarrollados.

El trabajo del IRC, está orientado a la generación, transferencia y aplicación de información y experiencia para el mejoramiento de los suministros de agua y el saneamiento. En su metodología, enfatiza la integración de aspectos técnicos y socioeconómicos y concentra esfuerzos en la participación de la comunidad, el papel de la mujer, el uso apropiado de la tecnología, la educación en salud y el desarrollo de estrategias para facilitar el intercambio de información.

Las solicitudes para mayor información sobre el IRC, deben dirigirse a:

IRC
P.O. BOX 93190, 2509 AD
LA HAYA, PAISES BAJOS

*Fuentes Renovables de
Energía para Sistemas de
Abastecimiento de Agua*

FUENTES RENOVABLES DE ENERGIA PARA SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

E. H. Hofkes and J.T. Visscher

ISBN 8869
232.0 90F4

Traducido por
Carlos F. Dierolf
para
CINARA
Centro Inter-Regional de Abastecimiento y Remoción de Agua
Cali, Colombia
1990

Documento Técnico 23
IRC International Water and Sanitation Centre
La Haya, Países Bajos

Fuentes renovables de energía para sistemas de abastecimiento de agua: Hofkes, E.H. y Visscher, J.T. (Traducido por C. Dierolf) (1990) Fuentes renovables de energía para sistemas de abastecimiento de agua. (Serie DT No. 23). Cali, Colombia, IRC, 172pp, incluyendo 19 tablas, 59 figuras, y una bibliografía seleccionada.

ISBN 90-6687-013-3

Resumen

El potencial para la utilización de las fuentes renovables de energía (energía solar, energía eólica, energía hidráulica, energía de la biomasa) para accionar sistemas de bombeo de agua para sistemas de suministro en áreas rurales está recibiendo atención creciente. La evaluación y selección de estas fuentes de energía y sistemas de bombeo requieren de un análisis cuidadoso de una amplia gama de factores. Este libro provee una guía e información para apoyar la consideración sistemática de las fuentes renovables de energía y equipos de bombeo para suministro de agua en regiones apartadas. En la parte I (Capítulos 1-3), se discuten los múltiples factores que se deben considerar y la metodología de selección que debe seguirse para en la evaluación de las fuentes de energía y la selección del sistema de bombeo. En la Parte II (Capítulos 4-8), se presenta información actualizada sobre la tecnología de bombas solares, bombas eólicas, bombas movidas por energía hidráulica, y sistemas de bombeo que utilizan la energía de la biomasa.

Palabras Clave: equipos de bombeo/ sistemas de suministro para regiones apartadas/ energía/ estudios de factibilidad/ análisis comparativos/ costos/ energía solar/ bombas eólicas/ energía hidráulica/ biomasa/ criterios de selección.

© Derechos Reservados por el IRC International Water and Sanitation Centre.

El IRC tiene derechos reservados según el Protocolo 2 de la Convención Universal de Derechos de Autor. Sin embargo, por medio de la presente se dá permiso para la reproducción de este material, parcial o totalmente, para propósitos educativos, científicos o relacionados con el desarrollo, excepto aquellos que incluyan venta comercial, siempre y cuando (a) se cite completamente la fuente, y (b) se notifique por escrito al IRC, P.O. Box 93190, 2509 AD The Hague, Países Bajos.

Reconocimientos edición en español

El presente documento fue traducido al español con el patrocinio del Ministerio de Vivienda, Planeamiento Físico y Medio Ambiente, por CINARA, Centro Inter-Regional de Abastecimiento y Remoción de Agua, en el marco de su Convenio con la Universidad del Valle y de las actividades que viene realizando con el IRC, International Water and Sanitation Centre.

La traducción y la producción de la versión en español de este libro en el CINARA fue coordinada por el ingeniero Carlos F. Dierolf, Docente regularmente adscrito a la Sección de Ciencias Térmicas de la Facultad de Ingenierías de la Universidad del Valle. En la revisión de una primera versión de la traducción colaboraron los siguientes profesionales: Luz Stella Berón, Alvaro Orozco, Hernán García, Alberto Galvis, Jorge Latorre, Edgar Quiroga y Javier Fernández.

El IRC aprecia y reconoce estos importantes esfuerzos y espera con interés que ellos contribuyan a nuevos avances en el aprovechamiento de los recursos renovables de energía en América Latina.



TABLA DE CONTENIDO

	Página
Prefacio	XV
Reconocimientos	XVII
1 Fuentes de energía para el suministro de agua a pequeñas comunidades	1
1.1 Requerimiento de energía	1
1.2 Fuentes convencionales de energía	4
1.3 Fuentes renovables de energía	5
Bibliografía	11
2. Consideraciones para selección de fuente de energía	12
2.1 Factibilidad ambiental	13
2.2 Factibilidad técnica y social	16
2.3 Factibilidad económica	22
2.4 Estudios de planta piloto	25
2.5 Selección local	25
Bibliografía	29
3. Análisis comparativo de costos	30
3.1 Categorías de costos	30
3.2 Cálculo comparativo de los costos	31
3.3 Análisis de costos usando datos ajustados	33
3.4 Estimación de costos recurrentes	34
3.5 Sistemas de bombeo que usan fuentes de energía convencionales	35
3.6 Sistemas de bombeo que usan fuentes renovables de energía	36
3.7 Tanques de almacenamiento	39
3.8 Comparación de costos	40
3.9 Efecto de las suposiciones hechas sobre los resultados de los cálculos de costos	43
Bibliografía	44
4. Nociones básicas de bombeo y selección de bombas	45
4.1 Especificación de la capacidad de bombeo	45

4.2	Características de la fuente de agua	48
4.3	Requerimientos de potencia y eficiencia de bombeo	49
4.4	Requerimientos de mantenimiento y reparación	51
4.5	Tipos de bombas	51
4.6	Características principales de varios tipos de bombas	59
	Bibliografía	63
5.	Energía solar	64
5.1	Sistemas solares de bombeo	67
5.2	Sistemas fotovoltaicos de bombeo	67
5.3	Celdas fotovoltaicas, módulos y arreglos	71
5.4	Subsistema motor-bomba	74
5.5	Equipo adicional	76
5.6	Eficiencias de conversión	77
5.7	Acoplamiento del conjunto bomba-motor a las características de potencia de salida del arreglo	78
5.8	Requerimientos de almacenamiento de agua	79
5.9	Dimensionamiento aproximado de sistemas de bombeo fotovoltaico	79
5.10	Sistemas termodinámicos de bombeo	82
	Bibliografía	84
6.	Energía eólica	85
6.1	Sistemas eólicos de bombeo de agua	86
6.2	Rotores eólicos	87
6.3	Torres	88
6.4	Sistemas de transmisión	88
6.5	Mecanismos de control	89
6.6	Teoría básica del bombeo eólico	90
6.7	Recolección de datos y régimen de vientos	92
6.8	Selección del sitio	94
6.9	Diseño	94
6.10	Estimación de la potencia hidráulica de salida	96
6.11	Mantenimiento	97
	Bibliografía	100

7. Energía hidráulica	102
7.1 Bombas de ariete hidráulico	102
7.2 Bombas de turbina	109
7.3 Bombas de corriente de río	111
Bibliografía	113
8. Energía de la biomasa	114
8.1 Procesos de producción de biogás	114
8.2 Planta de producción de biogás	117
8.3 Motores que usan biogás como combustible	123
8.4 Gasificación	123
8.5 Motores que usan gas de producción como combustible	126
8.6 Producción de etanol	127
8.7 Motores que usan etanol como combustible	127
Bibliografía	128
Apéndices	
Apéndice A	
Glosario de términos	131
Apéndice B	
Fabricantes y proveedores	138
Apéndice C	
Fuentes de información	144

INDICE DE TABLAS

	Pág.
2.1 Indicación de los requerimientos mínimos para la factibilidad ambiental de las fuentes renovables de energía	14
2.2 Frecuencia de atención y mantenimiento y nivel de destrezas técnicas requeridas para varios tipos de equipos de bombeo	17
2.3 Indicación de requerimientos de servicios de respaldo para varios tipos de equipos de bombeo	18
2.4 Niveles de costos de capital y costos recurrentes para varios tipos de sistemas de bombeo	23
3.1 Costos de capital y costos recurrentes de un sistema de bombeo de agua	30
3.2 Variación del factor de recuperación de capital, según la tasa de descuento y vida útil	33
3.3 Factores de ajuste usados para convertir precios de mercado a costos reales en la región de Morogoro en Tanzania	34
3.4 Indicación de costos de capital para bombas solares fotovoltaicas	37
3.5 Indicación de los requerimientos de almacenamiento de agua para varios tipos de sistemas de bombeo	39
3.6 Costos indicativos de varios tipos de tanques de almacenamiento de agua	39
3.7 Comparación de costos de bombas eólicas, bombas solares y bombas Diesel de un sitio en particular	40
4.1 Características de diversos tipos de bombas	60
4.2 Ventajas y deventajas de varios tipos de bombas	61
6.1 Indicación de pérdidas de potencia en sistemas de bombeo eólico	117
7.1 Caudal de agua entregado (q) como proporción del caudal de entrada (Q) para bombas de ariete hidráulico que operan bajo varias combinaciones de cabezas de suministro (H) y entrega (h)	131

8.1 Razones carbono/nitrógeno de varios materiales de biomasa	117
8.2 Parámetros para producción de biogás y rango general de valores óptimos	117
8.3 Tasas de producción de biogás para varios tipos de alimento	145
8.4 Producción de etanol para varios tipos de fuentes de carbohidratos	150

LISTA DE FIGURAS

	Página
1.1 Resumen de fuentes de energía y elementos de conversión para el bombeo de agua (cuadro)	2
1.2 Indicación de pérdidas de energía en el sistema de bombeo de agua (Kenna, 1985)	3
1.3 Bomba cónica con rotor multi-aspas (Brown, 1978)	7
1.4 Sistema de bombeo solar fotovoltaico (Kenna, 1985)	8
1.5 Características principales de un biodigestor (Hall, 1982)	10
2.3 Rango estimado de factibilidad económica de fuentes de energía para un requerimiento particular de bombeo	24
2.4 Tabla de selección para la determinación de fuente(s) de energía y sistema(s) de bombeo que deben considerarse para un sitio en particular	26
4.1 Componentes de la cabeza total de bombeo	47
4.2 Efecto de abatimiento causado por la extracción de agua de un pozo	48
4.3 Curvas de operación para una bomba centrífuga	50
4.4 Principio de operación de una bomba recíproca de pistón	52
4.5 Principio de operación de una bomba de diafragma	53
4.6 Partes principales de una bomba rotatoria helicoidal	54
4.7 Etapa de una bomba centrífuga	55
4.8 Bomba sumergible	56
4.9 Bomba de turbina de pozo profundo	57
4.10 Partes principales de una bomba de flujo axial	58
4.11 Indicación general de rangos de aplicación para varios tipos de bombas	59

5.1	Los caminos para la radiación solar	64
5.2	Irradiación diaria global promedia (MJ/m ² /día) sobre el plano horizontal (WMO, 1981)	65
5.3	Variación anual, mensual y diaria de la irradiación solar para una localidad árida y otra húmeda en el trópico (Halcrow & Partners y IT Power, 1982)	66
5.4	Configuraciones para sistemas fotovoltaicos de bombeo: (a) motor y bomba de succión montados en la superficie (Kenna, 1985); (b) conjunto sumergible bomba/motor	68
5.5	Conversión de potencia en un sistema fotovoltaico de bombeo	69
5.6	Relación entre irradiancia, potencia de salida del arreglo, y caudal de bombeo para una bomba solar fotovoltaica (Halcrow & Partners y IT Power, 1981)	70
5.7	Configuración de una celda fotovoltaica de silicio (Halcrow & Partners y IT Power, 1982)	72
5.8	Estructura de montaje para un arreglo fotovoltaico	73
5.9	Curvas de corriente/voltaje para un arreglo fotovoltaico (Grundfos, 1985)	73
5.10	Curvas para dimensionamiento aproximado de un sistema de bombeo fotovoltaico (Halcrow & Partners y IT Power, 1983)	81
5.11	Configuración básica de un sistema termodinámico solar de bombeo (Halcrow & Partners y IT Power, 1981)	83
6.1	Distribución mundial de potencia eólica (WMO, 1978)	85
6.2	Tipos de rotores usados en bombas eólicas	87
6.3	Mecanismo de transmisión para una bomba eólica que usa bomba de pistón	88
6.4	Flujo másico de aire	91
6.5	Conversión de potencia en una instalación de bombeo eólico	93
6.6	Efecto de varios tipos de obstrucciones y características topográficas sobre la velocidad del viento	95
6.7	Zona de turbulencia detrás de una obstrucción	95
6.8	Curva de potencia para una bomba eólica	96
6.9	Estimación de potencia hidráulica promedia de salida de una bomba eólica (Rastogi, 1982a)	98
6.10	Determinación de la energía hidráulica de salida para una bomba eólica (Rastogi, 1982b)	98
7.1	Instalación típica de una bomba de ariete hidráulico	102
7.2	Ejemplo de una bomba de ariete hidráulico (John Blake Ltd.)	103

7.3	Ejemplo de bomba de ariete hidráulico de bajo costo (Watt, 1975)	104
7.4	Ejemplo de bomba de ariete hidráulico construida de componentes estándar (Watt, 1975)	104
7.5	Operación de la bomba de ariete hidráulico	106
7.6	Parámetros de diseño para una instalación de bomba de ariete hidráulico	107
7.7	Bombas de ariete hidráulico que operan en paralelo	109
7.8	Partes principales de una bomba de turbina desarrollada en la China (Collett, 1982)	110
7.9	Bomba de corriente de río de ITDG (Collett, 1981)	112
8.1	Producción de biogás como función del período de retención y de la temperatura (BORDA, 1982)	116
8.2	Planta de producción de biogás básica que usa tambores como digestores	118
8.3	Digestor circular de domo fijo usado en la China (McGarry, 1978)	119
8.4	Digestor KVIC con campana de acumulación de biogás flotante (Tam, 1983)	120
8.5	Digestor Janata con domo fijo (Barnett, 1978)	120
8.6	Digestor con campana flotante sellada con agua (Pyle, 1982)	121
8.7	Digestor de bolsa flexible (Pyle, 1983)	121
8.8	Digestor de dos cámaras con campana flotante, de las Filipinas (Arceo, 1983)	122
8.9	Modificación a motor Diesel para usar combustible dual (Kasturirangan, 1976)	124
8.10	Carburador diseñado para motor de gasolina que funciona con biogás (Kasturirangan, 1976)	124
8.11	Diagrama esquemático de un gasificador (Jain, 1984)	125



Prefacio

En comunidades mayores, el requerimiento de agua es mayor de lo que puede suministrarse con un sistema basado en una bomba manual. En estos casos, los sistemas de bombeo basados en bombas eléctricas o Diesel son los más comúnmente usados. Sin embargo, y particularmente en las áreas rurales remotas de los países en desarrollo, se encuentran dificultades considerables al usar bombas Diesel o eléctricas, que incluyen el alto costo de mantener un suministro continuo de combustible o electricidad, infraestructura y conocimientos para operación y mantenimiento inadecuados, y limitaciones organizativas. Como resultado, se está dirigiendo cada vez más atención al potencial de usar fuentes renovables de energía para sistemas de suministro de agua de tamaño mediano en áreas rurales.

Estas fuentes de energía, las cuales son colectivamente llamadas fuentes renovables de energía, son la energía solar, la energía eólica, la hidroenergía y los combustibles derivados de la biomasa. La investigación y el desarrollo, apoyados en pruebas de campo, han llevado los sistemas de bombeo que usan estas fuentes de energía a un estado de bombeo eléctrico o Diesel.

Sin embargo, la falta de información práctica es una limitación importante para quienes deben tomar decisiones, y para los planificadores e ingenieros, en la evaluación de sistemas de bombeo que usan fuentes renovables de energía para aplicaciones a gran escala en programas nacionales de suministros de agua. Este libro ha sido producido para ayudar a conocer mejor los equipos de bombeo con energías renovables. El libro está dividido en dos partes. La primera parte discute la preselección de los sistemas de bombeo más apropiados para un país o región. Las consideraciones que se tratan son la factibilidad ambiental, técnica, social y económica. Se presenta el análisis comparativo de costos como una herramienta útil para este proceso de preselección. La segunda parte del libro da información detallada sobre los diferentes sistemas de bombeo basados en energías renovables.

Al final de cada capítulo, el lector encontrará una bibliografía. Esta es una combinación de referencias y material para lectura adicional, seleccionada de un gran cúmulo de fuentes.



Reconocimientos

Muchos han contribuido a la recopilación de material y a la preparación de este libro, el cual es el producto final de un proyecto de síntesis de conocimientos, llevado a cabo con el apoyo financiero del Ministerio de Vivienda, Planeamiento Físico y Medio Ambiente y el Ministerio de Cooperación para el Desarrollo de Holanda. El proyecto fue guiado por un comité directivo compuesto por los Sres. J. Boer y A.P. Hamburger del Ministerio de Cooperación para el Desarrollo.

En las etapas iniciales, se contrató un grupo de consultores para seleccionar y recopilar información sobre los diferentes equipos que operan con energías renovables que se presentan en el libro:

Los Sres. P.L. Fraenkel, A. Derrick, y J. F. Kenna, de Intermediate Technology Ltd. (Tecnología Intermedia Ltda.), Reading, Reino Unido, sobre sistemas de bombeo solares; los Sres. W. A. M. Jansen y S. J. de Boer de Consultancy Service Wind Energy Developing Countries (Servicios de Consultoría en Energía Eólica para Países en Desarrollo), Amersfoort, Holanda, sobre bombas eólicas; los Sres. J. Tacke y J. Walter, del Center for International Cooperation and Appropriate Technology, Delft, University of Technology (Centro para Cooperación Internacional y Tecnología Apropriada, Universidad tecnológica de Delft), Delft Holanda, sobre sistemas de bombeo con energía hidráulica; el Sr. H. C. van de Mandele, de International Water Supply Consultants (Consultores Internacionales de Suministro de Agua), Rotterdam, Holanda; y el Sr. A. M. Mueller, de The International Land Reclamation and Irrigation Institute (Instituto Internacional de Recuperación de Tierras e Irrigación), Wageningen, Holanda, sobre análisis comparativo de costos de sistemas de bombeo.

Varios Miembros del grupo de profesionales del IRC han contribuido significativamente a la preparación del libro:

El Sr. S. Veenstra ayudó en la selección y evaluación de materiales y contribuyó a la redacción de varias secciones; la Sra. Christine van Wijk-Sijbesma revisó el borrador y contribuyó específicamente a la sección sobre planeamiento, participación comunitaria y educación en salud; el Dr. A. T. White contribuyó con materiales para varias secciones, específicamente sobre los aspectos sociales en el proceso de selección para equipos de bombeo con energías renovables.

El IRC está particularmente agradecido por las revisiones críticas y comentarios constructivos sobre el borrador final, hechos por:

Sr. J. Freedman del Banco Mundial, Washington D.C., EEUU; Dr. J. Christmas de UNICEF, Nueva York, EEUU; Sr. J. Boer del Ministerio de Relaciones Exteriores (Directorado General de Cooperación Internacional), La Haya, Holanda; Sr. R. Trietsch, de DHV Ingenieros Consultores, Amersfoort, Holanda; Sr. T. Lium, de Norconsult Ingenieros Copnsultores, Sandvik, Noruega; y el Sr. P. Bruyere, del Grupo de Investigación e Intercambios de Tecnología, París, Francia.



1. Fuentes de energía para el suministro de agua a pequeñas comunidades

En los países en desarrollo, las fuentes de energía comúnmente utilizadas para el suministro de agua a pequeñas comunidades son el músculo humano, el combustible Diesel, y la electricidad. Las bombas manuales pueden ser utilizadas en pequeñas comunidades rurales, pero en comunidades mayores, las necesidades de agua usualmente son mucho mayores de la capacidad de una sola bomba manual. En tales casos, se pueden utilizar bombas manuales adicionales, pero un sistema mayor, basado en una motobomba Diesel o eléctrica puede ser más atractivo. Sin embargo, sus altos costos, las dificultades en asegurar suministros continuos de combustible y los requerimientos de operación y mantenimiento, hacen el uso de tales bombas menos atractivo para comunidades en áreas remotas.

Por consiguiente, el interés en fuentes renovables de energía, tales como la energía solar, la energía eólica, la hidroenergía y los combustibles de la biomasa ha aumentado. Los sistemas de bombeo basados en estas fuentes de energía se han convertido en sistemas técnicamente confiables y económicamente atractivos, particularmente para pequeños sistemas de suministro de agua con una capacidad de hasta 250 m³/día. El número de personas a servir con un sistema de bombeo de este tamaño varía, dependiendo del clima, las prácticas de uso del agua, y la facilidad del suministro. Usualmente, el consumo de agua está entre 20 y 100 litros por persona por día, pero puede ser mayor si el sistema también es utilizado adicionalmente para el abrevadero de animales domésticos o la irrigación de pequeñas parcelas.

1.1 REQUERIMIENTO DE ENERGIA

Elevar agua desde su fuente a una elevación mayor requiere una fuente de energía, un aparato para la conversión de energía y de un aparato de bombeo. Por ejemplo, para convertir la energía eólica a una forma adecuada para la bomba, se usa un rotor para producir potencia mecánica al eje, la cual puede ser transmitida a la bomba. La Figura 1.1 da una visión global de las fuentes de energía usadas para el bombeo de agua y de los aparatos utilizados para su conversión.

Fuente de Energía	Elementos de Conversión
Energía humana	MECANISMO DE PALANCAS
Energía animal	SISTEMA DE ENGRANAJES
Combustible fósil	MOTOR DE COMBUSTION
Electricidad (red)	MOTOR ELECTRICO
Energía hidráulica	BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO
	TURBINA O ROTOR DE CORRIENTE DE RIO
Energía eólica	ROTOR EOLICO MULTIASPAS DE BAJA VELOCIDAD
	ROTOR EOLICO DE ALTA VELOCIDAD CON GENERADOR ELECTRICO + MOTOR ELECTRICO
Energía solar	ARREGLO FOTOVOLTAICO + MOTOR ELECTRICO
Energía de biomasa	DIGESTOR + MOTOR DE COMBUSTION
	GASIFICADOR + MOTOR DE COMBUSTION
	FERMENTADOR DE ALCOHOL + MOTOR DE COMBUSTION

Figura 1.1. Resumen de fuentes de energía y elementos de conversión para el bombeo de agua.

La energía requerida para el bombeo de agua está determinada por la cantidad de agua a ser elevada, la cabeza contra la cual debe ser elevada, y la eficiencia global de conversión de energía del sistema de bombeo. La energía requerida es directamente proporcional a los primeros dos factores, e inversamente proporcional a la eficiencia de conversión, la cual indica cuánta de la energía suministrada se usa realmente para elevar el agua (Figura 1.2)

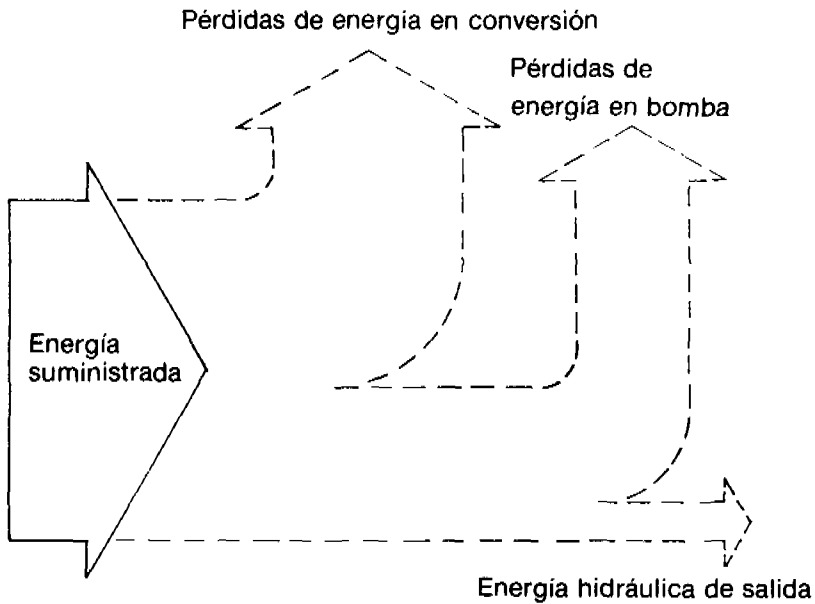


Figura 1.2: Indicación de pérdidas de energía en el sistema de bombeo de agua (Kenna, 1985).

La energía requerida por segundo, esto es, la potencia requerida para bombear agua, puede ser calculada mediante la siguiente relación:

$$P = \frac{\rho_w \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta}$$

donde :

P = Potencia requerida (Watt)

ρ_w = Peso específico del agua (kg/l)

g = Aceleración debida a la gravedad (m/s^2)

Q = Caudal (l/s)

H = Cabeza de bombeo (m)

η = Eficiencia global del sistema de bombeo (decimal)

Por ejemplo, para bombear agua con un peso específico de 1 kg/l, con un caudal de un litro por segundo contra una cabeza de 10 m, usando un sistema de bombeo con una eficiencia global del 20%, en un lugar donde la aceleración debida a la gravedad es de 9.8 m/s^2 , se requeriría suministrar potencia de 500 vatios (W), ó 0.5 kilovatios (kW). Si este sistema opera ocho horas al día, el agua suministrada sería de $8 \times 3600 = 28\,800 \text{ l/d} = 28.8 \text{ m}^3/\text{d}$ contra una cabeza de 10 m, para un requerimiento de energía de $8 \times 0.5 = 4$ kilowatt-hora (kWh).

1.2 FUENTES CONVENCIONALES DE ENERGIA

Energía humana

El uso de bombas manuales o de aquellas operadas por el pie está limitado a lugares donde las necesidades del agua son relativamente pequeñas.

La energía humana disponible para el trabajo, como por ejemplo para el bombeo de agua, depende de la fuerza y edad del usuario de la bomba, la duración de la tarea, y las condiciones ambientales. A un nivel cómodo, la energía producida por un ser humano durante un periodo prolongado puede estimarse entre 50 y 75 W. Así, una persona puede producir una cantidad de energía del orden de 0.4 a 0.6 kWh en ocho horas. Con este suministro de energía, se pueden bombear unos 8 a 12 m³ de agua contra una cabeza de 10 m, asumiendo que la eficiencia mecánica de la bomba es del 50%. Como los músculos de las piernas son más poderosos, las bombas movidas por las piernas pueden producir más agua que las manuales. Sin embargo, estas bombas no son muy populares entre las mujeres y los niños, y debido a su forma de operación, su confiabilidad es limitada.

La experiencia en el campo indica que las bombas manuales son operadas hasta 12 o inclusive 16 horas diarias, pero como no son usadas continuamente, el tiempo efectivo de bombeo es aproximadamente la mitad. Usando como criterio un máximo de ocho horas diarias de bombeo efectivo, una bomba manual en un pozo de 20 a 30 metros de profundidad puede suministrar entre 4 y 5 m³ de agua, para servir entre 150 y 200 personas con 25 litros diarios.

Energía animal

La energía promedia proporcionada por un animal de tiro para un periodo de ocho a diez horas por día, es generalmente entre cinco y diez veces mayor que la de un hombre. Un animal de unos 500 kg de peso corporal, moviendo un aparato de bombeo adecuado, puede elevar entre 25 y 50 m³ de agua contra una cabeza de 10 m en ocho a diez horas, asumiendo una eficiencia del 20%. Los animales son usados principalmente en aparatos de bombeo de movimiento

lento para elevar agua para riego, como lo son las norias, las bombas de cadena o aparatos con recipientes y cuerdas. La potencia animal, aunque tiene un buen potencial de aplicación, no es usada frecuentemente para suministros de agua potable en comunidades, posiblemente porque los animales son propiedad de individuos. Por consiguiente, la potencia animal no se considerará en el resto de este documento.

Combustible Diesel

En sistemas de bombeo a pequeña escala se usan motores Diesel de baja velocidad. Se requiere un sistema de transmisión adecuado, tal como una caja con piñonería o una correa de transmisión, y un mecanismo de embrague para conectar el motor a la bomba. Los motores Diesel pequeños tienen una eficiencia de alrededor del 10 o el 15%. Debido a las pérdidas adicionales en la transmisión y la bomba, la eficiencia de conversión es normalmente entre el 5 y el 10%, pero la eficiencia real bajo condiciones de campo depende fuertemente del nivel de mantenimiento del motor. Los motores Diesel requieren un buen nivel de mantenimiento y de un suministro regular de combustible y de repuestos, los cuales son difíciles de lograr en pequeñas comunidades. Adicionalmente, la vida útil de los sistemas Diesel de bombeo es limitada. Las bombas Diesel tienen la desventaja adicional de que su potencia es relativamente alta para sistemas de suministro de agua para pequeñas comunidades, pues no se consiguen motores menores de 3 kW. Los motores a gasolina o kerosene son menos eficientes y más costosos de operar que los motores Diesel, y por consiguiente son raramente usados para suministrar agua a comunidades.

Electricidad

Los motores eléctricos se producen en muchos tamaños y para una amplia gama de especificaciones. La eficiencia de conversión entre corriente eléctrica y agua bombeada para una bomba movida por un motor eléctrico es de aproximadamente 30-40%. La electricidad como fuente de energía para el bombeo de agua es económica sólo si se dispone de un suministro confiable desde una red primaria localizada cerca a la instalación de la bomba, normalmente a menos de un kilómetro. En la mayoría de los países en desarrollo, la electricidad es una fuente de energía menos atractiva por las frecuentes interrupciones en el suministro y las grandes fluctuaciones en el voltaje de la línea.

1.3 FUENTES RENOVABLES DE ENERGIA

La confiabilidad técnica, el rendimiento y el costo de los sistemas de bombeo que usan fuentes renovables de energía ya ha llegado al punto de ser competitivo con

sistemas que usan fuentes convencionales. Este es particularmente el caso en sistemas de pequeña escala, con capacidades inferiores a 250 m³/día. El costo de inversión en equipos de bombeo con energías renovables es relativamente alto, pero estos pueden ser competitivos por sus bajos costos de operación. No hay costos asociados con el combustible, y los costos recurrentes de operación y mantenimiento son limitados. La fabricación local en el país o región podría reducir el costo de inversión, lo cual en muchas situaciones hará que estos sistemas sean competitivos con aquellos que usan fuentes convencionales. Sin embargo, la mayoría de sistemas que utilizan fuentes renovables de energía requieren niveles altos de tecnología para su producción, y personal técnico muy bien entrenado para su mantenimiento y reparación.

Energía hidráulica

Se ha desarrollado una amplia gama de equipos para bombeo que utilizan la energía del agua en movimiento. Aquí, la atención se centrará en pequeños equipos que convierten la energía del agua en movimiento directamente en potencia mecánica para mover una bomba. Estos sistemas bombean agua desde fuentes superficiales y pueden operar continuamente. Existen tres tipos principales de bombas operadas por hidroenergía para el suministro de agua a pequeñas comunidades:

- Bombas de ariete hidráulico
- Bombas de turbina
- Bombas de corriente de ríos.

Las bombas de ariete hidráulico usan la energía cinética del agua que fluye por un tubo de suministro para elevar una pequeña porción de esa agua a una altura mayor que la de la fuente. Pueden operar confiablemente donde hay un suministro continuo y constante de agua con una caída de 0.8 m o más. Las bombas de ariete tienen considerable potencial para elevar agua para pequeñas comunidades desde quebradas no contaminadas o nacimientos en regiones quebradas o montañosas.

Las bombas de turbina tienen una hélice impulsora sumergida acoplada a la bomba sobre el mismo eje de forma tal que la potencia se transmite directamente a la bomba. En contraste con las norias de movimiento lento, operan a velocidades relativamente altas, y pueden trabajar satisfactoriamente con cabezas tan bajas como 0.5 m, como por ejemplo en una pequeña presa en una quebrada.

Las bombas de corriente de ríos están montadas sobre una plataforma flotante. Tienen un rotor parcialmente sumergido, el cual rota debido a la fuerza de la corriente. La potencia del eje del rotor es transmitida a la bomba por un mecanismo de transmisión de engranajes o de correa, el cual igualmente multiplica la velocidad rotacional a los niveles requeridos para un bombeo eficiente.

Energía eólica

La energía del viento, o energía eólica ha sido usada para propósitos diversos por más de 2000 años, y es ampliamente utilizada hoy en día en muchos países para irrigación y drenaje. El uso potencial de la energía eólica para el bombeo de agua en sistemas a pequeña escala es afectado notablemente por las velocidades locales del viento y por el régimen de vientos. Por ejemplo, a una velocidad del viento de 5 m/s, se puede generar una potencia el doble de la generada para una velocidad de 4 m/s. Un sistema de bombeo eólico, o bomba eólica, consiste de un rotor, una bomba y un mecanismo de transmisión de potencia, el cual conecta el rotor a la bomba. El tipo más común de bomba eólica tiene un rotor de aspas múltiples montado en un eje horizontal el cual transmite la potencia a la bomba mediante una varilla metálica (Figura 1.3). La mayoría de las bombas de este tipo operan enfrentadas al viento. Generalmente tienen un sistema de control para proteger al rotor contra el desbocamiento, o sea rotar demasiado rápido en

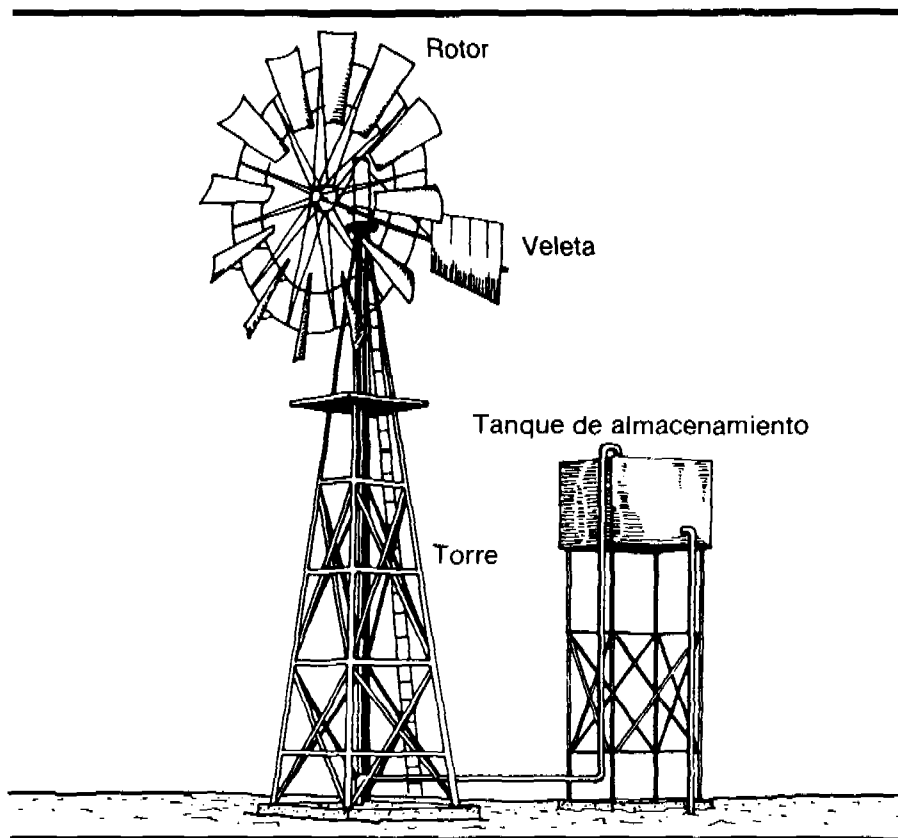


Figura 1.3: Bomba eólica con rotor multi-aspas (Brown, 1978)

vientos muy altos. Este sistema de control, o bien frena el rotor, o bien lo orienta fuera del viento cuando las velocidades del viento se vuelven excesivas.

Los tipos más conocidos de rotores de eje vertical son los rotores Darrieus y Savonius. Como estos rotores no son capaces de arrancar solos, no son particularmente adecuados para instalaciones de bombeo sin operario. Se pueden usar generadores eléctricos movidos por el viento para proporcionar energía a bombas eléctricas. En tal caso, se requiere un dispositivo de control para estabilizar el voltaje y la corriente para una operación eficiente de la bomba eléctrica.

Aunque los costos de inversión de las bombas eólicas son mayores que los de bombas Diesel o eléctricas de la misma capacidad, los costos de operación menores y vida útil mayor pueden hacer que las bombas eólicas sean económicamente atractivas en áreas con suficiente viento y un régimen de vientos favorable. En áreas donde hay periodos relativamente largos de calma, se requieren tanques de almacenamiento muy grandes y entonces las bombas eólicas probablemente no sean económicamente atractivas.

Energía solar

Existen dos tipos de equipos fundamentalmente diferentes que usan la energía solar para el bombeo de agua, los aparatos térmicos y los sistemas fotovoltaicos.

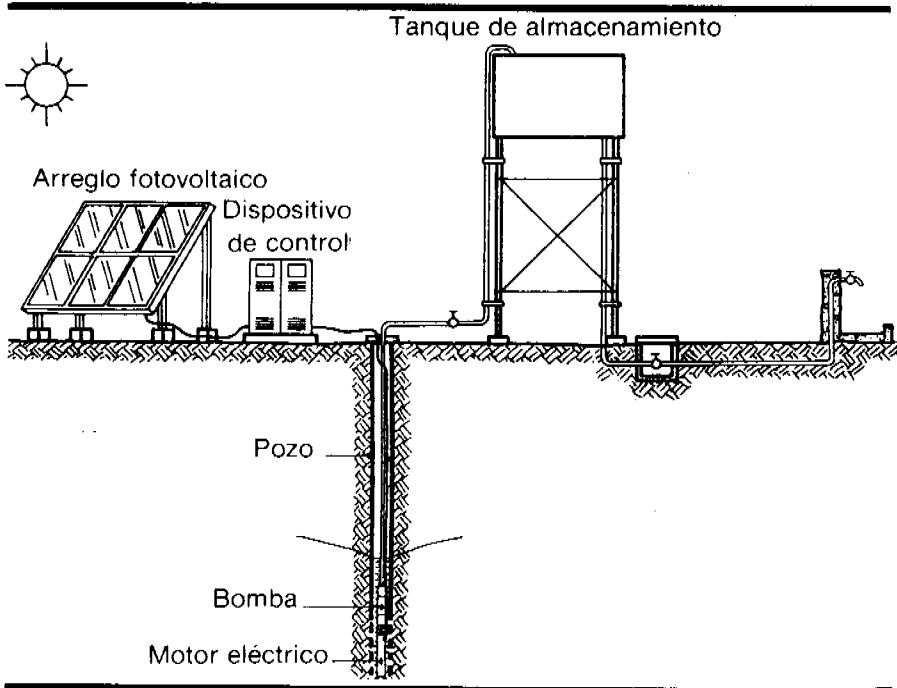


Figura 1.4: Sistema de bombeo solar fotovoltaico (Kenna, 1985)

Para la conversión termodinámica de la energía solar, se pueden usar varios tipos de máquinas térmicas para producir la energía mecánica requerida para mover la bomba, de las cuales las más conocidas son la máquina de vapor y la máquina Rankine. Sin embargo, los sistemas de bombeo termodinámicos de tamaño pequeño generalmente tienen una eficiencia muy baja, son bastante complicados, y hasta el momento no se han desempeñado adecuadamente bajo condiciones de campo.

En los sistemas de bombeo fotovoltaicos, la radiación solar se convierte en electricidad mediante celdas solares, las cuales son interconectadas en módulos puestos en un arreglo. Comercialmente, se consiguen un buen número de estos sistemas, los cuales son técnicamente confiables y se han desempeñado bien bajo condiciones de campo. Usualmente, pero no en todos los casos, se incorpora un dispositivo de control para estabilizar las fluctuaciones en voltaje y corriente de la energía suministrada por el arreglo de módulos. Si el motor eléctrico está diseñado para corriente alterna, se requiere un inversor para convertir la corriente directa suministrada por los módulos en corriente alterna (Figura 1.4). La modularidad de los sistemas fotovoltaicos es una ventaja marcada. Si se requiere mayor potencia, el arreglo de módulos puede ser fácilmente expandido agregando más módulos. En contraste, se debe instalar un motor Diesel de mayor tamaño si se requiriera una mayor potencia en una instalación de este tipo. Las bombas fotovoltaicas tienen un potencial de aplicación bastante considerable en áreas remotas donde las condiciones solares son favorables.

Energía de la biomasa

La biomasa es usada ampliamente como fuente de energía, principalmente para cocinar y para calefacción en muchos países en desarrollo, especialmente en áreas rurales. Los excrementos humanos y de animales, desechos domésticos, madera, residuos de cosechas, o malezas acuáticas pueden ser procesadas para producir gases combustibles tales como el biogás o gas de pirólisis, o combustibles líquidos tales como el alcohol, el metanol o los aceites vegetales. Estos gases y líquidos pueden ser usados como combustibles para pequeños motores que impulsan bombas.

El biogás se produce en un digestor, que es un tanque especialmente construido en el cual reacciona una suspensión de biomasa en agua. El biogás producido consiste principalmente de metano (50-60%) y bióxido de carbono (40-50%). Los principales componentes del digestor se muestran en la Figura 1.5. La factibilidad de la producción de biogás depende de la temperatura ambiente, del suministro en forma regular de biomasa adecuada durante todo el año, y de la disponibilidad de mano de obra entrenada para la operación y mantenimiento de la planta. En muchos casos, las principales barreras contra el uso de sistemas de biogás son de tipo socio-cultural y organizacional.

El proceso de gasificación consiste en la combustión parcial de biomasa sólida, tal como leña, carbón vegetal, carbón, cascarilla de coco, o tusas de maíz, para producir un gas combustible conocido como gas de pirólisis. Se puede producir alcohol de plantas con un alto contenido de azúcares o almidones, tales

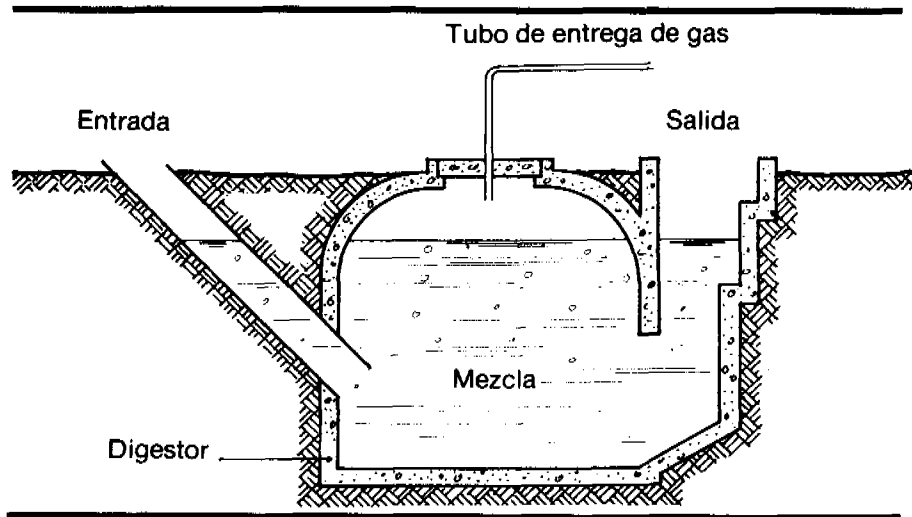


Figura 1.5: Características principales de un biodigestor (Hall, 1982)

como la caña de azúcar, el sorgo o la yuca, y puede ser utilizado directamente, o mezclado con gasolina, como combustible motor. Los aceites vegetales, tales como el aceite de girasol, también pueden ser procesados para producir combustible para motores.

BIBLIOGRAFIA

- BROWN, N. L. (ed.) (1978). Renewable energy sources and rural applications in the developing world. New York, USA, American Association for the Advancement of Science.
- COMITE INTER-ETAT D'ETUDES HYDRAULIQUES (1980). Energie au service de l'hydraulique rural. Ouagadougou, Burkina Faso, Comité Inter-Etat d'Etudes Hydrauliques.
- GIRI, J., and MEUNIER, B. (1977). Evaluation des energies nouvelles pour le developement des etats africaines (collection "technologies et Développement" No.1). Paris, France, Ministère de la Cooperation.
- GOURPÈRES, D. LE (1982). Energie eolienne. Paris, France, Editions Eyrolles.
- HALL, D. O., BERNARD, G. W., and MOSS, P. A. (1982). Biomass energy for developing countries. Oxford, UK, Pergamon Press.
- KENNA, J. P., and GILLET, W. B. (1985). Solar water pumping: handbook. London, UK, Intermediate Technology Publications Ltd.
- LYSEN, E. H. (1983). Introduction to wind energy (CWD publication 82-1). Amersfoort, The Netherlands, Consultancy Services Wind Energy Developing Countries.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES (1976). Energy for rural development: renewable energy sources and alternative technologies for developing countries. Washington, DC, USA, National Academy of Sciences.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES (1981). Energy of rural development: supplement. Washington, DC, USA, National Academy of Sciences.
- PARK, J. (1981). The wind power book. Palo Alto, California, USA, Cheshire Books.
- SEMA S. L. (1978). Energies nouvelles et developpement (Collection "Technologies et Développement" No. 2). Paris, France, Ministère de la Cooperation.
- WATT, S. B. (1975). Manual on the hydraulic ram for pumping water. London, UK. Intermediate Technology Publications Ltd.
- WOOD, A. D. (1976). Water lifters and pumps for the developing world. Tucson, Colorado, USA, Colorado State University.

2. Consideraciones para la selección de fuente de energía

Para seleccionar la fuente de energía renovable más apropiada para sistemas pequeños de bombeo de agua, se deben considerar factores ambientales, sociales, técnicos y económicos. Las condiciones del medio ambiente en el área pueden reducir la factibilidad de ciertas fuentes renovables. Por ejemplo, la velocidad promedio del viento puede ser inferior a la requerida para el uso económico de bombas eólicas. La organización social, las destrezas técnicas, o la infraestructura pueden no ser adecuadas para cumplir con los requerimientos técnicos de ciertos sistemas de bombeo. En programas nacionales a gran escala, la falta de personal debidamente entrenado, las fallas organizacionales, o las instalaciones inadecuadas para mantenimiento no son impedimentos definitivos. Si un gobierno nacional está interesado en introducir sistemas de bombeo basados en energías renovables, entonces se puede preparar su aplicación en gran escala mediante programas de entrenamiento y el desarrollo de infraestructura para el funcionamiento y mantenimiento de estos equipos de bombeo. Para un número grande de unidades, puede ser igualmente factible la iniciación de producción local.

Para proyectos locales pequeños que se refieren a la instalación de uno o pocos sistemas de bombeo en algunos sitios, la selección está restringida por limitaciones en la infraestructura local, en las capacidades técnicas, las habilidades y los materiales. La instalación de un equipo de bombeo que tiene requerimientos de operación y mantenimiento más allá de estas limitaciones, inevitablemente lleva al fracaso y al despilfarro de fondos, o alternativamente hace que la comunidad dependa del apoyo de afuera.

Debe hacerse un valoración sistemático de todos los factores relevantes en la selección de fuentes apropiadas para el bombeo de agua (ver Figura 2.1). De esta manera, se pueden pre-seleccionar una o más fuentes renovables. Sin embargo, los datos disponibles en muchos casos no son ni suficientes ni confiables, y se puede requerir un proyecto piloto para estudiar y probar la factibilidad de las fuentes pre-seleccionadas y de los sistemas de bombeo. Estos proyectos son de particular relevancia para programas de suministro de agua en áreas rurales de países que tienen poca experiencia en el uso de equipos de energías renovables. Basado en el estado de desarrollo de la tecnología y de datos de costos para 1985, el orden general de preferencia para la selección es de hidróenergía, energía eólica, energía solar y energía de biomasa.

Factores	Criterios de selección	Información Requerida
Factibilidad ambiental	Disponibilidad de energía	<ul style="list-style-type: none"> - Datos sobre fuentes de energía - Hidrología - Clima - Topografía
Factibilidad técnica	Nivel existente de infraestructura tecnológica	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño - Fabricación - Instalación - Operación - Mantenimiento
Factibilidad social	Aceptabilidad social de la fuente de energía y el equipo de bombeo	<ul style="list-style-type: none"> - Estructura social - Organización - Potencial para el uso productivo del agua - Deseo y capacidad de pago
Factibilidad económica	Efectividad en costos de sistemas de energía	<ul style="list-style-type: none"> - Datos de costos - Perfiles de costos en el tiempo - Economías de escala - Fabricación local

Figura 2.1: Valoramiento sistemático de factores relevantes en la selección de fuentes de energía para bombeo.

2.1 FACTIBILIDAD AMBIENTAL

Datos básicos

Una primera indicación de la disponibilidad de fuentes renovables de energía en el área de estudio puede ser obtenida de mapas que muestren la distribución global de estas fuentes. Existe una relación general entre la disponibilidad de energía renovable y el clima (Barnett, 1982). En las zonas áridas tropicales que comprenden la región del Sahel, Arabia Saudita, Irán y Pakistán, Perú y Chile, y la mayor parte de Australia, la energía solar es abundante, mientras que la hidroenergía y la biomasa son limitadas. En zonas húmedas tropicales, tales como las cuencas del Amazonas y el Congo, la parte sur del Africa occidental, el Africa oriental, partes de Kenya y Tanzania, Madagascar, la mayor parte de

Malasia, partes de Tailandia, Indonesia y Papua Nueva Guinea, la hidroenergía y la energía de la biomasa pueden ser prometedoras, pero la energía solar es menos atractiva debido a los períodos relativamente largos de nubosidad durante las épocas de lluvia. Donde existen estaciones secas y húmedas bien marcadas, tales como en el Africa Central cerca al ecuador, el sur de Venezuela y el este de Brasil, se requiere un análisis detallado de la variación estacional para valorar el potencial de las fuentes renovables de energía a lo largo del año. Los regímenes buenos de vientos se encuentran primordialmente en las zonas costeras donde los vientos son relativamente fuertes y regulares a lo largo del año. Por ejemplo, en las áreas costeras de América del Sur, la costa Atlántica del Africa Occidental, las llanuras del Africa del Norte, también en Malasia e Indonesia, las Filipinas, y la mayoría de las islas del Pacífico, existe un buen potencial para energía eólica. Los requerimientos mínimos para la factibilidad ambiental de los sistemas de bombeo utilizando energía renovable están dados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Indicación de los requerimientos mínimos para la factibilidad ambiental de las fuentes renovables de energía.

Fuente renovable de energía	Requerimientos mínimos para factibilidad ambiental
Micro hidráulica	
Bombas de ariete hidráulico	Caudal mensual promedio de por lo menos 3-5 l/s en combinación con una cabeza hidráulica de por lo menos 1m.
Bombas de corriente de río	Velocidad mínima de corriente de 1 m/s.
Energía Eólica	
Bombas eólicas	Velocidad promedio anual mayor de 3.5 m/s Velocidad promedio en el mes de menos viento mayor a 2.5 m/s
Energía Solar	
Bombas fotovoltaicas	Irradiación promedio anual de por lo menos 15 MJ/m ² d (4.0 kWh/m ² d) Irradiación solar del mes de mínima insolación mayor de 12.5 MJ/m ² d (3.5 kWh/m ² d) Factor de claridad (falta de nubes) por lo menos 60%.
Energía de Biomasa	
Producción de biogás	Clima húmedo, temperatura promedio anual mayor de 15°C.
Gasificación	50-100 kg diarios de residuos de cosechas secos de una 10 a 20 hectáreas por día
Producción de alcohol	200-400 hectáreas de tierra para la producción de cosechas para energía

El valoramiento inicial del potencial de las varias fuentes de energía debe ser seguido por un estudio más detallado para determinar el potencial dentro del país particular o región. Esto se puede hacer basado en la disponibilidad de datos o su recolección, tales como el régimen de vientos, la temperatura ambiente y la irradiación solar. Este tipo de información a veces se consigue en instituciones nacionales y estaciones metereológicas, o en la Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza. Preferiblemente, estos datos deben cubrir un período de 5 o más años para establecer con un buen grado de confiabilidad, los promedios anuales y mensuales del área en cuestión.

Si no hay disponibilidad de datos suficientes y confiables, éstos deberán recogerse en el campo. Se requiere como mínimo el registro durante un año de los datos esenciales, de los cuales se puede obtener una indicación suficiente de variación mensual y estacional. En algunos casos, puede ser posible extrapolar hasta un grado razonable de confianza usando datos de otras localidades. Por ejemplo, un valor estimado del promedio mensual de la irradiación solar puede ser derivado de datos para países vecinos. Los datos de velocidad del viento no pueden ser extrapolados de datos de otras regiones, porque están grandemente afectados por la topografía local y en consecuencia pueden mostrar una variación considerable. Debido a sus costos, la colección de datos debe ser restringida a lo esencial. En algunas áreas, las condiciones generales pueden favorecer fuertemente una fuente renovable de energía particular, y entonces la colección de datos puede ser restringida a esa opción.

Energía hidráulica

El número de sitios recomendables para el uso de sistemas de bombeo movidos por hidroenergía es limitado en la mayoría de los países y regiones. El requerimiento principal es un flujo continuo y adecuado de agua con una caída suficiente a lo largo del año. No se tienen a disposición datos de flujo para la mayoría de pequeñas quebradas, ríos y nacimientos, para períodos largos y de esta forma, muchas veces es necesario hacer mediciones locales.

Energía eólica

En aquellos sitios donde la velocidad promedio del viento es superior a 3.5 m/s, y la velocidad promedio en el mes de menores vientos es mayor de 2.5 m/s, el viento puede ser una fuente adecuada y confiable de energía para el bombeo de agua. Se requiere un registro de velocidades promedias horarias por áreas cubriendo un período de por lo menos un año, preferiblemente un año y medio, para determinar si los sistemas de bombeo eólicos son factibles. Son necesarios datos de velocidad de vientos en el mes de menores vientos para valorar si las bombas eólicas son económicamente factibles, porque la longitud de los períodos sin viento determinan la capacidad de almacenamiento requerida para

asegurar un sistema de suministro de agua razonablemente confiable, y de esta forma una gran parte del costo del sistema de bombeo eólico.

Energía solar

Las áreas que tienen niveles de irradiación y factores de claridad que cumplen con los requerimientos dados en la Tabla 2.1 para sistemas de bombeo fotovoltaico, se encuentran primordialmente entre los trópicos de Cáncer y Capricornio. En zonas áridas tropicales, la irradiación promedia diaria muchas veces llega a valores de 15 a 20 MJ/m²d (4.0-5.5 kW/m²d), lo cual es suficiente para sistemas solares de bombeo. Los niveles de irradiación generalmente son menores en áreas húmedas tropicales, pero aún pueden ser suficientes para la operación de bombas solares. Los sistemas de bombeo fotovoltaicos se consideran ambientalmente factibles en áreas con una irradiación promedia diaria mayor de 12MJ/m²d. Los sistemas de bombeo termodinámico no han sido desarrollados lo suficiente para tenerlos en cuenta como una opción factible o viable para sistemas de bombeo de agua en pequeña escala.

Energía de la biomasa

Generalmente, la biomasa es favorable desde el punto de vista ambiental en áreas húmedas tropicales en donde la temperatura ambiente a lo largo del año es mayor de 15°C, donde hay suficiente pluviosidad y brillo solar, y donde se tengan condiciones favorables de suelos, para asegurar un suministro continuo y generoso de biomasa apropiada. Debido al tamaño mínimo de una planta de procesamiento de biomasa y las economías asociadas, la energía de la biomasa sólo debe considerarse para necesidades de bombeo mayores de 150 m³/d.

La conversión de la biomasa se considera principalmente como una tecnología de producción de energía, pero tiene beneficios ambientales adicionales porque puede mejorar la disposición de desechos y producir fertilizantes para la producción agrícola. Donde se considere la energía de la biomasa para el bombeo del agua, debe dársele atención a asegurar el suministro de biomasa adecuada a largo plazo.

2.2 FACTIBILIDAD TECNICA Y SOCIAL

Los equipos de bombeo de agua que utilizan energías renovables varían considerablemente en complejidad técnica, y por consiguiente en requerimientos operacionales y de mantenimiento. En general, los sistemas complejos de bombeo, muchas veces importados, requieren mayor atención calificada que equipos sencillos fabricados localmente, pero con menor frecuencia. Por ejemplo, el mantenimiento de un sistema de bombeo fotovoltaico requiere una visita por un

equipo móvil de técnicos calificados una o dos veces al año. En contraste, las bombas hidráulicas o las bombas eólicas pueden ser mantenidas normalmente por mecánicos locales. Las bombas con motores de combustión que funcionen con mezclas de Diesel y combustible de biomasa requieren mantenimiento extensivo y revisiones frecuentes, generalmente cada dos o tres meses. La mayoría de los sistemas de bombeo con energías renovables requieren un servicio de respaldo muy bien establecido para su mantenimiento (Tabla 2.2).

Tabla 2.2: Frecuencia de atención y mantenimiento y nivel de destrezas técnicas requeridas para varios tipos de equipos de bombeo.

Fuente de energía	Tipo de equipo de bombeo	Frecuencia de atención de mantenimiento ¹	Conocimientos técnicos ²
Renovable			
Micro-hidráulico	Ariete hidráulico	Bajo	Bajo
	Bomba de turbina	Bajo	Medio
	Bomba de corriente de río	Bajo	Bajo
Energía eólica	Fabricado comercialmente	Bajo	Medio
	Tecnología intermedia	Medio	Medio
	Producido a nivel de aldea	Alto	Bajo
Energía solar	Fotovoltaico	Bajo	Alto
Energía de la biomasa	Digestor de biogás	Alto	Medio
	Unidad de gasificación	Alto	Alto
	Fermentador de alcohol	Alto	Alto
Convencional			
Energía humana	Bomba manual	Medio	Bajo
Combustible diesel	Motor diesel	Medio	Medio
Electricidad	Motor eléctrico	Bajo	Medio

¹ Bajo, una vez al mes; mediano, una vez a la semana; alto, diario.

² Bajo, personal de la aldea entrenado localmente; medio, operarios entrenados (mecánicos locales, carpinteros, herreros); alto, técnicos calificados.

Se debe hacer una provisión para operación y mantenimiento antes de que se instale el equipo de bombeo. Deben hacerse arreglos para que la comunidad usuaria, la entidad que suministra el agua, y las autoridades locales, cada uno tenga responsabilidades definidas para la dirección, operación y mantenimiento del sistema de bombeo. Estos arreglos deben hacerse en consulta con las

comunidades usuarias para que ellas estén completamente informadas y de acuerdo con sus responsabilidades y derechos en cada etapa del proyecto.

El servicio de respaldo para mantenimiento y reparación puede ser centralizado o descentralizado, dependiendo de la complejidad y frecuencia de los requerimientos de mantenimiento. La capacidad organizacional y técnica de la comunidad usuaria es uno de los factores determinantes en la escogencia del sistema de bombeo. Otros factores son la infraestructura existente, la organización social de la comunidad de usuarios, los costos y facilidades de transporte, y cualquier estructura existente de mantenimiento. Una indicación general de requerimientos de respaldo en mantenimiento está dada en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Indicación de requerimientos de servicios de respaldo para varios tipos de equipos de bombeo.

Fuente de energía	Tipo de equipo de bombeo	Frecuencia de apoyo de respaldo requeridos ¹	Nivel del apoyo de respaldo requerido ²
Renovable			
Micro-hidráulico	Ariete hidráulico	Bajo	Bajo
	Bomba de turbina	Bajo	Medio
	Bomba de corriente de río	Bajo	Medio
Energía eólica	Fabricado comercialmente	Bajo	Alto
	Tecnología intermedia	Medio	Medio
	Producido a nivel de aldea	Bajo	Bajo
Energía solar	Fotovoltaico	Bajo	Alto
Energía de la biomasa	Digestor de biogás	Medio	Medio
	Unidad de gasificación	Medio	Alto
	Fermentador de alcohol	Alto	Alto
Convencional			
Energía humana	Bomba manual	Bajo	Medio
Combustible diesel	Motor diesel	Medio	Alto
Electricidad	Motor eléctrico	Medio	Alto

¹ Bajo, una vez al año; mediano una vez cada 3-4 meses; alto una vez al mes.

² Bajo, mecánicos locales; medio, mecánicos especialmente entrenados; alto, técnicos altamente calificados.

La construcción e instalación del sistema de bombeo puede requerir conocimientos especiales, los cuales en muchos casos no están disponibles en el seno de la organización nacional o la agencia encargada del suministro del agua. Por consiguiente, se requerirá de entrenamiento para desarrollar su capacidad de asegurar la calidad de la construcción y la confiabilidad de la instalación.

Un principio que guíe los programas de suministro de agua para áreas rurales es que cada comunidad involucrada debe participar activamente en la escogencia del sistema de bombeo, de forma tal que las necesidades y preferencias locales sean tomadas en cuenta, y las consecuencias de las varias opciones sean conocidas por los usuarios. Se debe valorar el impacto del nuevo sistema de bombeo en la situación local y ésto puede necesitar de discusiones extensas con los futuros usuarios, particularmente las mujeres. Algunos grupos dentro de la comunidad pueden beneficiarse más que otros si, antes de la instalación, no se llega a un acuerdo sobre el uso del agua para irrigación de pequeñas parcelas, abrevamiento de ganado y otros usos productivos similares. Por ejemplo, los sistemas que requieran colección de biomasa en gran escala pueden ser una desventaja para los pobres. En muchas sociedades, las mujeres de los grupos más pobres tienen el derecho de recoger residuos orgánicos, tales como estiércol de ganado; ellos podrían perder este beneficio, si se vuelve financieramente atractivo para que otros grupos recojan esta biomasa.

Muchas veces es necesario establecer algún tipo de organización local, tal como un comité del agua, para participar en la selección y supervisión de los operarios locales de la bomba, para recaudar los dineros por el uso del agua y proveer la mano de obra de apoyo. La importancia del desarrollo de una organización apropiada, y el mejoramiento de conocimientos y destrezas locales se subestima la mayor parte de las veces. Se requiere un nivel mínimo de organización y destrezas a nivel local para asegurar el uso adecuado y el mantenimiento de los sistemas de bombeo, y para establecer el recaudo regular de los pagos del suministro de agua. La organización local es especialmente importante para la colección y uso de la biomasa, e incluye la necesidad de asegurar el pago a los proveedores de la biomasa. Los proyectos piloto dan una oportunidad muy buena para experimentar, y establecer las formas más apropiadas e involucrar a la comunidad.

Energía hidráulica

Los equipos de bombeo hidráulico requieren únicamente de un mantenimiento limitado, tal como una revisión periódica de las partes móviles, limpieza de la tubería de entrada y trabajo rutinario, incluyendo el engrase y el ajuste de tuercas y tornillos. Puede ser bastante difícil organizar el suministro de partes de repuesto para bombas hidráulicas importadas a menos que esté garantizado por una organización de servicio de respaldo. En general, estos tipos de equipos de bombeo no requieren un operario de tiempo completo; se puede nombrar una persona para revisar la bomba ocasionalmente y hacer el mantenimiento de rutina. Sin embargo, muchas veces será necesario hacer un tratamiento al agua porque es bombeada y suministrada directamente, y de esta forma los usuarios están expuestos a los riesgos de la contaminación.

Se requieren obras civiles para instalar sistemas hidráulicos de bombeo, como por ejemplo, construir una pequeña represa o ataguía para controlar el flujo de agua hacia el equipo de bombeo. El tamaño de estas obras civiles depende del sitio, pero si los materiales se pueden conseguir localmente, usualmente pueden

ser contruidos por mano de obra y contratistas locales. Las bombas de ariete hidráulico pueden requerir la diversión de una proporción considerable del agua desde la fuente. Esto puede llevar a conflictos sobre el uso del agua con las comunidades aguas abajo. Por consiguiente, las consecuencias posibles de las bombas de ariete deben ser discutidas con varias comunidades y se debe llegar a un acuerdo antes de su implementación.

Comercialmente se consiguen bombas de ariete muy robustas fabricadas en Europa, Norte América, India, Japón y Taiwan. Sin embargo, las pequeñas industrias o talleres locales en muchos países en desarrollo también deberían tener la posibilidad de fabricar bombas sencillas de ariete o ensamblarlas de partes que se consiguen localmente. En el momento se están fabricando bombas de ariete sencillo en India, Kenya, Tanzania y Zambia.

Actualmente las bombas de turbina son fabricadas únicamente en la República Popular China, donde han conseguido una reputación por sus diseños probados y por su confiabilidad. Las bombas de corriente de río son de diseños relativamente sencillos y pueden ser apropiadas para la fabricación local a partir de partes y materiales fácilmente conseguibles.

Energía eólica

Por ahora, la mayoría de bombas eólicas que se consiguen comercialmente son fabricadas en países desarrollados y enviadas a países en desarrollo. Estas bombas generalmente están bien diseñadas, son eficientes, robustas, pero son caras y su mantenimiento y reparación son difíciles porque los repuestos deben importarse. Las bombas eólicas de diseño relativamente sencillo pueden ser fabricadas localmente y a menor costo, pero requieren mayor mantenimiento y reparación. Si se requieren partes complejas, tales como piñonería u otros mecanismos de transmisión, puede ser necesaria su importación.

La turbulencia del viento y los cambios en su velocidad producen una carga fluctuante sobre la torre, lo cual puede causar fallas por fatiga en los materiales y las partes inadecuadamente construidas. Por consiguiente, un diseño y una construcción correctos de la torre y sus cimentaciones son esenciales como lo es un alineamiento cuidadoso del sistema de transmisión mecánica para la operación confiable de las bombas eólicas.

Las partes en movimiento de los sistemas de bombeo eólicos están sujetas a cargas variables, fatiga, corrosión y polvo, y por consiguiente, se necesita una revisión y mantenimiento regular para su operación confiable. Alguien de la localidad deberá hacer el mantenimiento rutinario, tal como ajustar las tuercas que se han aflojado, y engrasar y lubricar la bomba. Las bombas eólicas fabricadas localmente generalmente necesitan un mantenimiento frecuente. Se requiere el apoyo de una organización de servicio o de un taller local para reparaciones mayores.

La instalación de una bomba eólica a veces requiere la remoción de árboles que estén cerca al rotor. Puede ser necesario compensar a aquellos que pierden el beneficio de usar estos árboles permitiéndoles, por ejemplo, usar el agua en exceso producida en períodos de altos vientos para la irrigación de pequeñas parcelas, el abrevamiento de ganado, o usos productivos similares.

Energía solar

Por ahora, los sistemas de bombeo fotovoltaico se consiguen únicamente de fabricantes en países desarrollados. Estos sistemas se ofrecen como un paquete completo, consistente en el arreglo solar, su sistema bomba-motor, y el equipo auxiliar. Aparentemente, en muchos países en desarrollo, existe la posibilidad de ensamble local, y en algunos países puede ser posible su fabricación local. Los sistemas de bombeo fotovoltaicos deben ser instalados por técnicos competentes, de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

Los requerimientos de mantenimiento de estos sistemas son limitados. La limpieza regular de las superficies transparentes del arreglo solar, y la revisión de los controles eléctricos, puede ser todo lo que se requiere en forma rutinaria. Adicionalmente, se requiere el recambio periódico en las escobillas en los motores que las tienen. Deben establecerse mecanismos para informar sobre fallas o daños del sistema al servicio de respaldo, porque las reparaciones mayores pueden ser hechas sólo por personal calificado. En la medida en que aumenta el número de sistemas de bombeo fotovoltaico en operación para el suministro de agua, se tendrá mayor información y datos sobre su desempeño en el campo, y de esta forma se podrá hacer una mejor programación del servicio de mantenimiento y revisión.

Energía de la biomasa

La plantas productoras de biogás son usadas en muchos países en desarrollo, particularmente la China e India. Los componentes principales de estas plantas pueden ser fabricados localmente, pero algunas de las partes más complejas pueden ser producidas únicamente en pequeñas industrias. Los gasificadores y las plantas fermentadoras de alcohol se consiguen primordialmente en los países desarrollados, pero pueden ser fabricados en los países en desarrollo. En las Filipinas se fabrican gasificadores comercialmente, con el apoyo del Gobierno, y existe experiencia considerable en el Brasil en la fabricación de plantas fermentadoras de alcohol. La instalación de los gasificadores y unidades de fermentación es relativamente sencilla, pero se debe poner atención cuidadosa a la selección del sitio para evitar los problemas de olores, humos y polvo.

Generalmente, una planta de procesamiento de biomasa requiere un operario entrenado y una cantidad considerable de mano de obra no entrenada para la recolección de la biomasa. En muchas áreas de la mayoría de los países en desarrollo, la biomasa es una fuente de combustible para muchos propósitos, incluyendo la cocción y el calentamiento. Por consiguiente, la introducción de producción de energía de la biomasa para el bombeo de agua sería únicamente factible si hay una cantidad generosa de biomasa disponible para evitar que escasee para los usos tradicionales. Su uso para la producción de combustible para el bombeo de agua debe ser discutido con la comunidad, para evitar conflictos acerca de su uso y colección presentes, muchas veces por los sectores más pobres. El suministro regular y constante de la biomasa requerida para el bombeo de agua no puede ser asegurado basado en labor voluntaria sin costo.

Los requerimientos de mantenimiento de los sistemas de bombeo que funcionan con biogás, gas de pirólisis, o alcohol, son similares a aquellos de los pequeños motores y de la planta productora de biomasa.

2.3 FACTIBILIDAD ECONOMICA

Análisis de costos

El análisis de costos es una herramienta útil para apoyar la selección de la fuente de energía renovable para el bombeo de agua en el área de estudio. Es necesario utilizar técnicas de descuento, ya que tanto los costos de capital como los costos recurrentes deben ser valorados, porque los diversos tipos de sistemas de bombeo bajo consideración tienen diferentes perfiles de costos en el tiempo. Por ejemplo, para las bombas solares, el costo de capital es relativamente alto y puede representar más del 70 al 75% de los costos totales durante la vida del proyecto, mientras que para bombas Diesel, el costo de capital es relativamente pequeño y puede ser sólo del 25 al 30% de los costos totales durante la vida del proyecto (ver Figura 2.2).

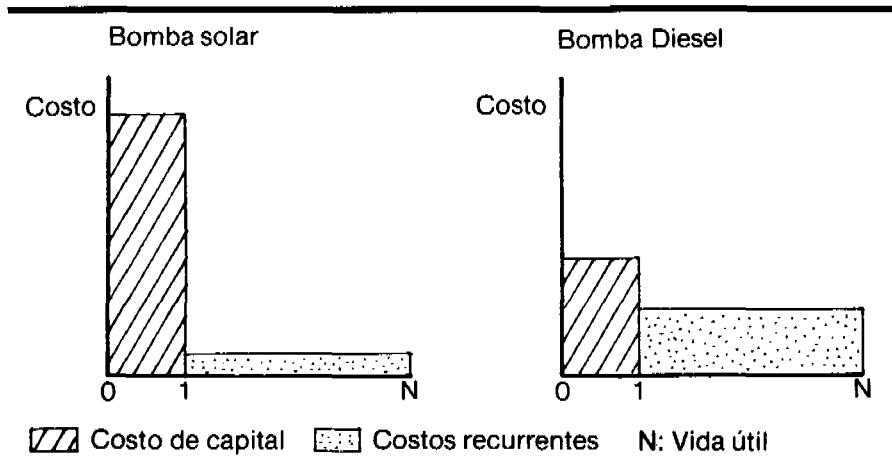


Figura 2.2: Comparación de perfiles de costos en el tiempo para una bomba solar y una bomba Diesel.

La distribución de los costos de capital y los costos recurrentes pueden afectar el nivel de la contribución financiera que debe ser cargada a los usuarios. En los sistemas rurales de suministro de agua, los costos de capital generalmente, son financiados por fondos del gobierno o de algún donante, mientras que los costos

recurrentes son pagados en su totalidad o en su mayoría por los usuarios. De esta forma, las comunidades usuarias pueden esperar que se les cobre menos por un sistema intensivo en capital y bajo en costos recurrentes que por el sistema con altos costos recurrentes. La Tabla 2.4 da una indicación de la distribución de costos de capital y costos recurrentes para varios tipos de sistemas de bombeo.

Tabla 2.4: Niveles de energía de costos de capital y costos recurrentes para varios tipos de sistemas de bombeo.

Fuente de energía	Tipo de equipo de bombeo	Costos de capital	Costos recurrentes
Renovable			
Micro-hidráulico	Ariete hidráulico	Bajo	Bajo
	Bomba de turbina	Bajo	Bajo
	Bomba de corriente de río	Bajo	Bajo
Energía eólica	Fabricado comercialmente	Alto	Bajo
	Tecnología intermedia	Medio	Medio
	Producido a nivel de aldea	Bajo	Medio
Energía solar	Sistema de bombeo Fotovoltaico	Alto	Bajo
	Energía de la biomasa	Digestor de biogás	Medio
Unidad de gasificación		Medio	Medio
Fermentador de alcohol		Medio	Medio
Convencional			
Energía humana	Bomba manual	Medio	Bajo
Combustible diesel	Motor diesel	Medio	Alto
Electricidad	Motor eléctrico	Medio	Bajo

Efecto de la fabricación local

Los costos de capital de un sistema de bombeo movido por fuentes renovables de energía podrían ser reducidos por una producción en gran escala para programas nacionales de suministros de agua en áreas rurales. El número mínimo de unidades requeridas para iniciar la fabricación local variará de un país a otro. Para estimular la producción local, se debe promover la investigación y el desarrollo de tecnologías de energía renovable. Si no existen capacidades de investigación y desarrollo en las industrias locales, se puede promover la fabricación local involucrando institutos de investigación del gobierno o universidades

técnicas. Aunque es altamente deseable aumentar la fabricación tanto a nivel local como nacional, por ahora, ésta generalmente se ve entorpecida por la falta de materiales apropiados, partes esenciales y conocimientos, e inicialmente el mercado puede ser demasiado pequeño para justificar la producción local. Por consiguiente, como una solución intermedia, se puede considerar el ensamble local de equipo importado, para reducir los costos de embarque y transporte internos.

Indicación general de rangos de factibilidad económica

Por ahora, están disponibles pocos datos recogidos sistemáticamente, y basados en la experiencia de campo, para valorar la factibilidad económica de sistemas de bombeo que utilizan energías renovables. Sin embargo, se han estimado rangos generales de factibilidad para las diferentes fuentes de energía, basados en datos globales de costos (Figura 2.3). Debe enfatizarse que estos rangos son únicamente indicativos, y que los datos locales de costos pueden dar un resultado

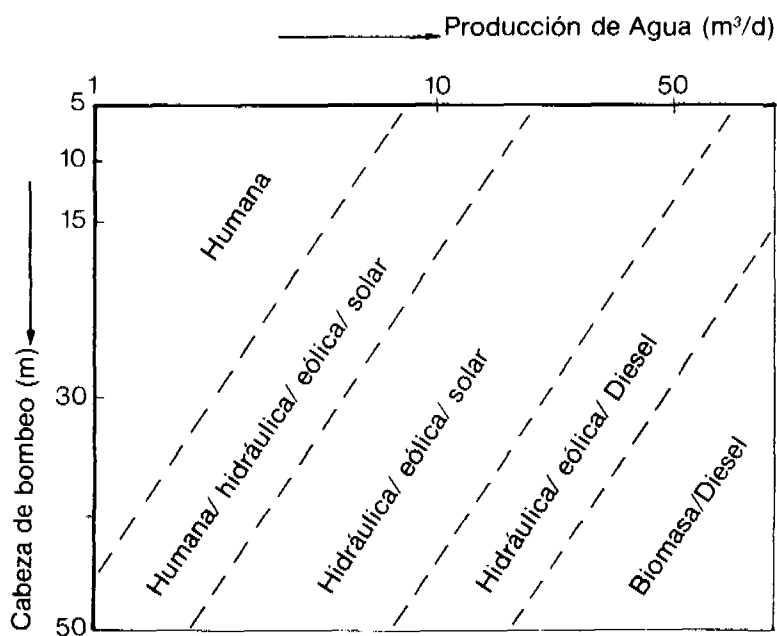


Figura 2.3: Rango estimado de factibilidad económica de fuentes de energía para un requerimiento particular de bombeo.

bastante diferente. De esta forma, la factibilidad económica de un sistema de bombeo en particular únicamente puede ser determinado usando datos locales de costos. Si al parecer varios tipos de sistemas de bombeo son económicamente factibles, la comparación de los costos unitarios de bombeo son importantes en el proceso final de selección. Estos costos unitarios son calculados por kWh de energía hidráulica entregada, o por m³ de agua bombeada (ver Capítulo 3).

2.4 ESTUDIOS DE PLANTA PILOTO

Usualmente, el proceso de selección indicará uno o dos tipos de sistemas de bombeo que tienen uso potencial en el área o el programa de suministro de agua rural bajo estudio. Entonces, son esenciales los proyectos piloto para valorar el comportamiento de estos equipos bajo condiciones de campo, para adaptar tecnología a condiciones locales, para apoyar el estudio económico, y para experimentar con métodos de involucrar las comunidades.

La prueba y monitoreo de sistemas de bombeo prototipos en universidades o institutos de investigación debe realizarse primordialmente para ganar experiencia y para mejorar diseños. Las plantas piloto son útiles para familiarizar a las autoridades nacionales y a los ingenieros con los nuevos tipos de sistemas de bombeo y para facilitar el entrenamiento de personal técnico de campo. Los resultados de los estudios de planta piloto deben ser revisados mediante evaluaciones periódicas, por lo menos en las etapas iniciales de la implementación general.

2.5 SELECCION LOCAL

Si los equipos de bombeo movidos por fuentes renovables de energía son seleccionados localmente para uno o unos pocos sitios, entonces las limitaciones impuestas por la situación técnica, social y organizacional son más estrictas que en programas grandes. El tipo de bombeo que se va a seleccionar tiene que acoplarse a la situación existente, esto es, debe ser apropiado para los conocimientos técnicos disponibles, y los talleres, equipo y capacidades de operación y mantenimiento existentes. Usualmente, para estas pocas instalaciones, no es económico ni factible iniciar un programa de entrenamiento, o establecer un sistema de servicio de respaldo. Es probable que esta situación limite gradualmente la factibilidad técnica para la mayoría de los tipos de equipos de bombeo bajo consideración. Sin embargo, es preferible aceptar esta limitación en vez de instalar equipo de bombeo que se dañará después de un corto período de tiempo. En una etapa temprana, la factibilidad de las opciones

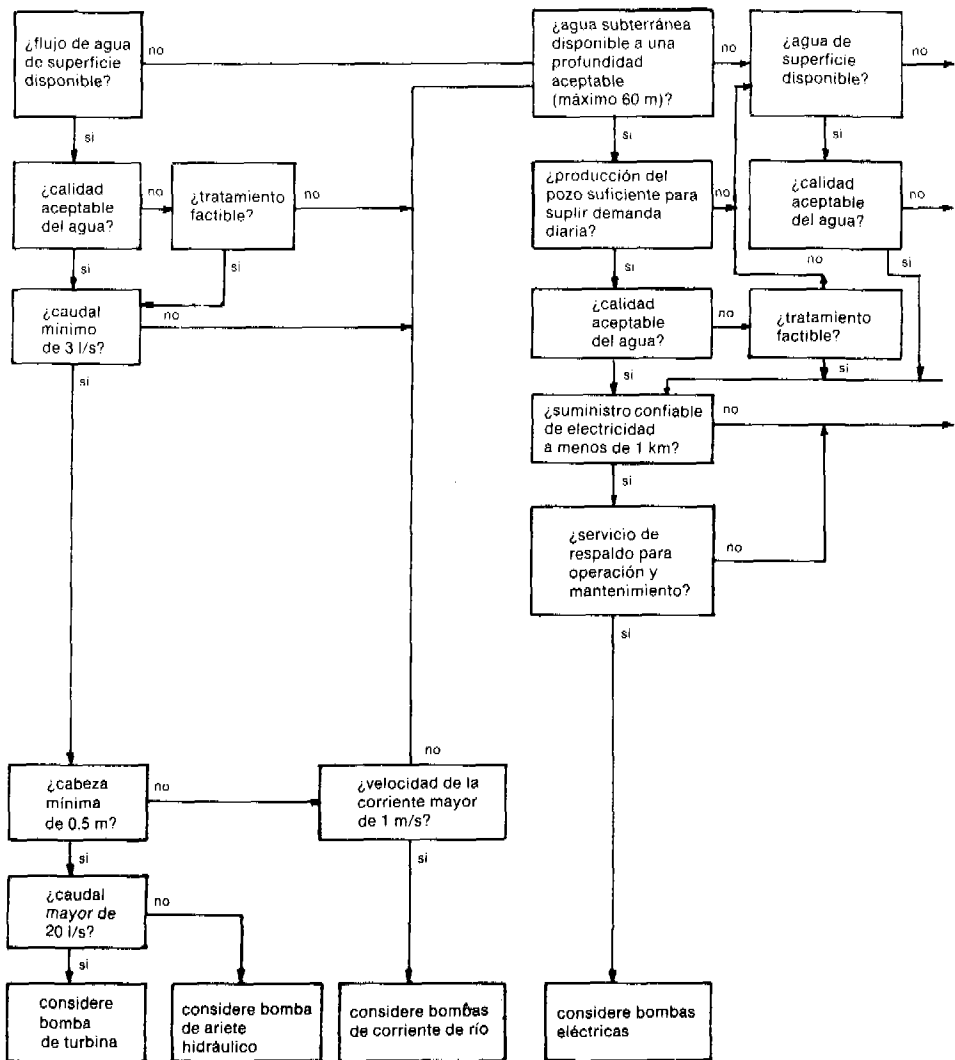
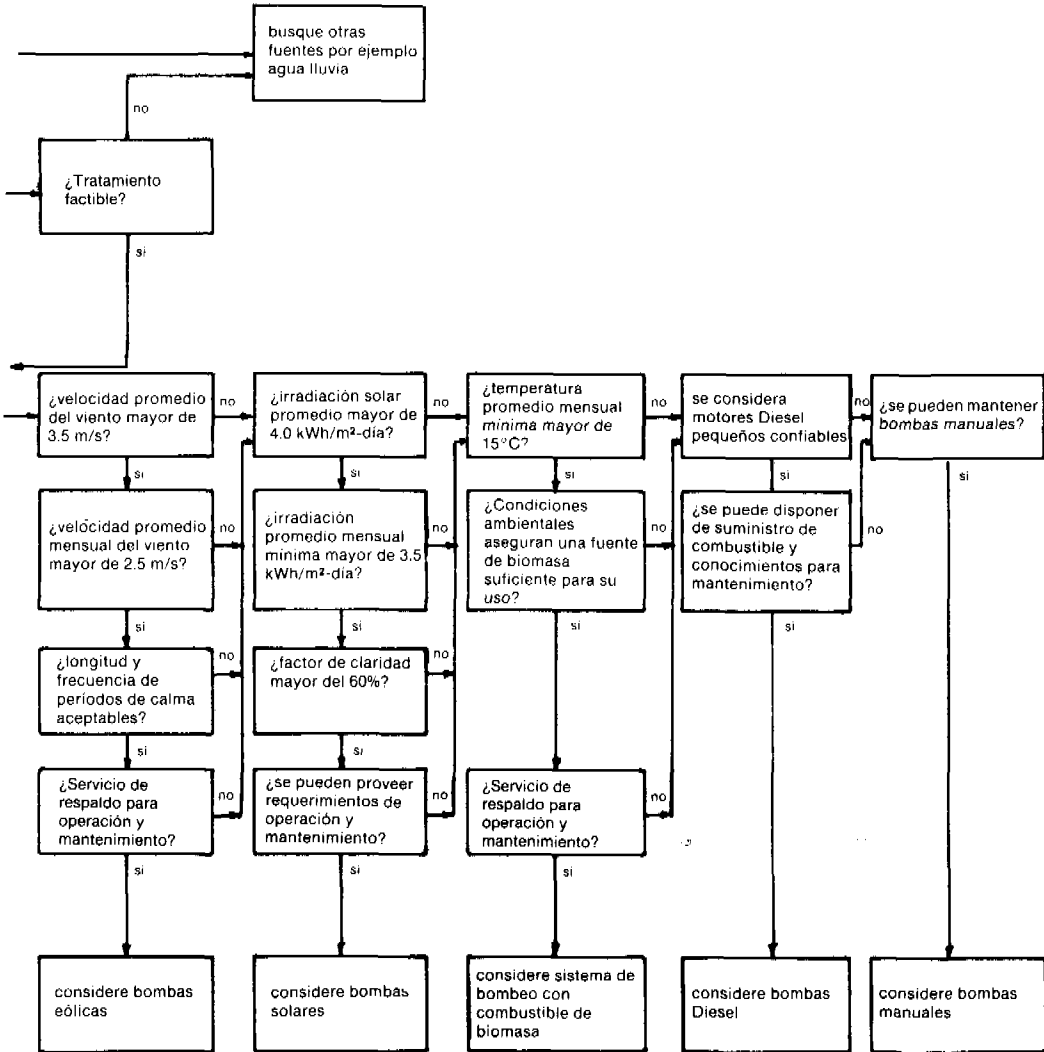


Figura 2.4: Tabla de selección para la determinación de fuente(s) de energía y sistema(s) de bombeo que deben considerarse para un sitio en particular.



debe ser discutida con la comunidad o sus líderes, y ellos deben participar en el proceso de toma de decisiones.

El diagrama de flujo de la Figura 2.4 puede ser utilizado para revisar la factibilidad de fuentes de energía para el bombeo de agua en una localidad específica. El punto de entrada a esta tabla de selección es la fuente de agua disponible. Los diversos tipos de fuente de energía deben ser considerados en el orden de su factibilidad técnica y su atractivo económico. Mediante este proceso paso a paso, se identifica el sistema de bombeo más promisorio. Si varias fuentes de energía son factibles, se debe hacer una comparación por costo unitario de agua suministrada (ver Capítulo 3).

BIBLIOGRAFIA

- BARNETT, A., BELL, M., and HOFFMAN, K. (1982). Rural energy and the third world. Oxford, UK, Pergamon Press.
- CAIRNCROSS, S., CaRRUTHERS, I., and FEACHEM, R. G.(1980). Evaluation for village water supply planning (IRC Technical Paper No. 15) The Hague, The Netherlands, International Reference Centre for Community Supply and Sanitation.
- ELMENDORF, M., and BUCKLES, P. (1981). Socio-cultural aspects of water supply and sanitation (World Bank Staff Paper No. 28). Washington, DC, USA, World Bank.
- FRENCH, D. (1982). The ten commandments of renewable energy analysis. World Development 10,1,71-19.
- HOFKES, E. H. (1983). Water pumping for rural water supply, Dakar, Senegal, Environment and Development Association (ENDA).
- SAUNDERS, R. J., and WARFORD, J. J. (1976). Village water supply: economics and policy in the developing world. Baltimore, Maryland, USA, John Hopkins University Press.
- SCALAFANI, J. A. (1981). Popular participation and the Bahr-El-Ghasal domestic water supply project: lessons and implications for UNICEF policy. Khartoum, Sudan, UNICEF.
- VISSCHER, J. T., and HOFKES, E. H. (1982). Rural water supply development (1982). Experiences from ghe Buba-Tombali Water Project, 1978-1981. The Hague, The Netherlands, International Reference Centre for Community Water Supply.
- WHITE, A. T. (1981). Participation and education in community water supply and sanitation programmes: concepts, strategies and methods (IRC Technical Paper No. 17). The Hague, The Netherlands, International Reference Centre for Community Water Supply and Sanitation.
- WHYTE, A. (1983). Guidelines for planning community participation in water supply and sanitation projects (document ETS/83.8). Geneva, Switzerland, World Health Organization.
- WIJK, C. Van (1985). Participation of women in water supply and sanitation: roles and realities (IRC Technical Paper No. 22). The Hague, The Netherlands, International Reference Centre for Community Water Supply and Sanitation.

3. *Análisis comparativo de costos*

El propósito del análisis comparativo de costos, tal como se presenta en este capítulo, es comparar el costo efectivo de los sistemas de bombeo. El análisis de costos debe ser específico para cada país o región en particular, y los resultados no pueden ser extrapolados a otros países o regiones.

3.1 CATEGORIAS DE COSTOS

Básicamente, se distinguen dos categorías de costos: costos de capital y costos recurrentes. Los costos de capital son todos los costos que se incurren cuando el equipo de bombeo es comprado e instalado. Los costos recurrentes corresponden a la operación, el mantenimiento y la reparación durante la vida útil del sistema de bombeo, incluyendo costos de combustible, piezas de repuesto, salarios y transportes. En la Tabla No. 3.1 se presentan para cada una de estas categorías.

La comparación de costos de diferentes equipos de bombeo no necesariamente debe tomar en cuenta todos los componentes del sistema de suministro de agua. El primer paso es identificar aquellos componentes comunes a los sistemas que se están comparando, por ejemplo, el sistema de distribución o la estructura de captación (pozo profundo). Estos costos serán los mismos para todos los tipos

Tabla 3.1: Costos de capital y costos recurrentes de un sistema de bombeo de agua

Costos de capital:	Terreno Preparación del sitio Cimentación Equipo de bombeo Tanque de almacenamiento Equipo que proporciona potencia Fuente motriz (ej. motor eléctrico, motor Diesel) Tubería y accesorios Instalación y montaje (ej. transporte, mano de obra)
Costos recurrentes	Elementos de consumo (ej. combustible, lubricantes) Salarios y jornales Repuestos y partes de cambio

de sistemas de bombeo en un lugar específico, y por consiguiente pueden ser excluidos del análisis comparativo de costos. Sin embargo, es útil estimar a nivel general estos costos, una vez se haya decidido el equipo de bombeo a utilizar. Por ejemplo, si los costos de construcción del sistema de distribución y de la perforación del pozo representan el 85% del costo total de capital, entonces una diferencia de costos del 20% entre dos sistemas de bombeo representa sólo el 3% del costo total del capital del sistema.

3.2 CALCULO COMPARATIVO DE LOS COSTOS

Para un análisis de costos confiable, los costos de capital y los costos recurrentes deben ser convertidos a unidades comparables. Se pueden utilizar dos métodos para este propósito:

- Valor presente
- Costo equivalente anual

Método del valor presente

El “valor presente” de los costos recurrentes futuros puede ser calculado proyectándolos al presente con una tasa apropiada, llamada la tasa de retorno. En caso de que no haya inflación, y el gobierno no establezca medidas de regulación, la tasa de interés puede usarse como tasa de descuento. Por ejemplo, para cubrir el costo de US\$ 99 por mantenimiento durante el próximo año, se puede hacer equivalente a US\$ 90 invertidos a una tasa de interés del 10%; y si la inversión de los US\$99 se requiere después de tres años, US\$74 invertidos al 10% serían equivalentes. Los cálculos del valor presente son más complicados cuando hay inflación, porque entonces es necesario el ajuste de la tasa prevalente de interés, incorporado el efecto de la inflación para poder obtener una tasa real de descuento.

El valor presente de un costo (C), incurrido en el año (n) en el futuro, puede ser calculado por la ecuación:

$$PV = \frac{C}{(1+r)^n}$$

En donde:

- VP = Valor presente del costo
- C = Valor futuro del costo
- n = Número de años
- r = Tasa de retorno

Los valores presentes de todos los costos recurrentes incurridos durante la vida útil del sistema son sumados al capital inicial para obtener una cifra total, la cual puede ser comparada para los diferentes sistemas de bombeo.

Método del costo equivalente anual

El costo de capital se hace equivalente a una serie de cuotas anuales distribuidas durante la vida útil del sistema de bombeo. La suma de los costos equivalentes anuales será mayor que el costo inicial del capital del sistema, porque el interés sobre la deuda que queda debe ser incluido en cada asignación anual. El costo equivalente anual de una inversión de capital (C), sobre una vida esperada de (n) años, puede ser calculado mediante la ecuación:

$$CEA = C \times \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

donde:

- CEA = Costo equivalente anual
- C = Costo inicial de capital
- n = Vida esperada
- r = Tasa de descuento

El costo total anual se obtiene sumando los costos anuales recurrentes al costo equivalente anual de capital, obteniéndose una cifra que se utiliza para comparar los distintos sistemas de bombeo. Este método es recomendado para efectuar análisis comparativos de costos de sistemas de bombeo por las siguientes razones: los costos recurrentes son difíciles de estimar correctamente, y puede ser necesario ajustarlos en la medida en que transcurre el tiempo. Esto se realiza más fácilmente con este método que con el anterior. Otra ventaja es que el costo equivalente anual total dividido por 365 da el costo diario de bombeo, el cual, dividido por la cantidad de agua producida, da el costo unitario por m³ de agua bombeada. Este costo unitario es particularmente útil en la comparación de costos de sistemas de bombeo.

Selección de la tasa de descuento

La tasa de descuento a ser utilizada varía de país a país. En general, el Banco Mundial aplica tasas de descuento en el rango de 8 a 15% para países en vía de desarrollo. Cuando no se tienen suficientes datos, es recomendable hacer cálculos para varias tasas de descuento para así obtener una indicación de su efecto sobre los resultados del análisis comparativo de costos.

Estimación de la vida útil

Es difícil estimar la vida útil de equipos de bombeo que utilizan fuentes renovables de energía, porque se han realizado muy pocas pruebas de campo. Se conoce más acerca de la vida útil de los otros componentes, tales como la tubería y los tanques. Es recomendable revisar el equipo de bombeo e identificar aquellos componentes a los cuales se les puede estimar razonablemente la vida

útil. Para los otros componentes se puede hacer un estimativo aproximado de diez años. Puede ser aconsejable hacer cálculos adicionales de costos, usando vidas útiles estimadas de 8 y 15 años, para observar la sensibilidad de los resultados del análisis ante estos cambios.

Factor de recuperación

El costo anual equivalente puede ser calculado usando un factor de recuperación de capital apropiado, el cual representa la cantidad que debe ser recaudada anualmente por unidad de moneda invertida para recuperar completamente la inversión. La Tabla 3.2 muestra los factores de recuperación de capital para varias combinaciones de vida útil y tasa de descuento.

Tabla 3.2: Factores de recuperación de capital para varias combinaciones de tasa de descuento y vida útil.

Vida útil (años)	Tasa de descuento (%)				
	5	8	10	12	15
5	0.23	0.25	0.26	0.28	0.30
10	0.13	0.15	0.16	0.18	0.20
15	0.09	0.12	0.13	0.15	0.17
20	0.08	0.10	0.12	0.13	0.16

Ejemplo: Inversión	US\$1000
Vida útil	10 años
Tasa de descuento	10%
Factor de recuperación de capital	0.16
Costo equivalente anual	US\$160

3.3 ANÁLISIS DE COSTOS USANDO DATOS AJUSTADOS

Si el análisis comparativo de costos se hace para apoyar la selección de sistemas de bombeo para unos pocos proyectos locales, es justificable basar el análisis de costos sobre precios o costos actuales para evitar cálculos complicados. Se pueden utilizar los precios de mercado para materiales de construcción, salarios y la tasa de interés corriente.

Sin embargo, cuando se hacen análisis comparativos de costos para apoyar a las autoridades nacionales, o a un programa de suministro de agua potable en áreas rurales en la selección de sistemas de bombeo en gran escala, deben ajustarse los precios de mercado o los costos observados para reflejar la disponibilidad real y el costo de los suministros. Por ejemplo, el costo real del personal entrenado, está relacionado con su

capacidad real de contribuir a la economía nacional, el cual en muchos casos es más alto que lo reflejado por su salario. Así, para hallar el costo real de la utilización de un recurso escaso, por ejemplo personal entrenado, el costo financiero (salario), debe ser ajustado para el país en cuestión.

En algunos países, la tasa de cambio de la moneda nacional es regulada por las autoridades y mantenida en valores altos, por medios artificiales. El costo real de la compra de productos extranjeros será más alto que el reflejado en el costo financiero, esto es, la cantidad en moneda local cotizada por el banco. La Tabla No. 3.3 consigna un conjunto de factores de ajuste usados para convertir precios de mercado a costos anuales en un proyecto de suministro de agua en la región Morogoro de Tanzania.

Tabla 3.3: Factores de ajuste usados para convertir precios de mercado a precios reales en la región de Morogoro en Tanzania

Categoría de costo	Factor de ajuste
Mano de obra no calificada	0.5
Personal calificado	1.5
Moneda extranjera	2.0
Materiales locales	1.0
Combustibles Diesel	4.0
Vehículos de transporte	2.5

3.4 ESTIMACION DE COSTOS RECURRENTE

Los costos recurrentes deben ser estimados para poder hacer comparaciones válidas de costos. Algunos costos recurrentes anuales tienen valores fijos, como por ejemplo, los salarios de los operarios, mientras que otros costos están relacionados con el periodo de tiempo durante el cual funciona el equipo de bombeo y por consiguiente, con la cantidad de agua suministrada, como por ejemplo, el consumo de combustible, los repuestos necesarios, y las reparaciones. Generalmente es mejor calcular los costos recurrentes para diversos sistemas por kWh de energía hidráulica de bombeo, o por m³ de agua bombeada. Para propósitos de comparación de costos, el costo por kWh hidráulico de bombeo es preferible porque toma en consideración tanto el agua bombeada como la cabeza de bombeo.

3.5 SISTEMAS DE BOMBEO USANDO FUENTES DE ENERGIA CONVENCIONALES

En esta sección se presentan datos generales de costos en dólares de los EEUU (1985) para sistemas convencionales de bombeo. Estos datos son sólo indicativos, debido a la insuficiencia de datos confiables.

Bombas manuales

El costo de capital para bombas manuales varía considerablemente, dependiendo de su tamaño, tipo y calidad de los materiales de construcción. Los precios corrientes se pueden consultar en los catálogos de proveedores. El costo de capital de una bomba manual puede estimarse aproximadamente en el rango de US\$300-US\$500. Los costos anuales de mantenimiento y reparación varían considerablemente, pero pueden ser asumidos entre US\$30 y US\$150 por bomba. Cuando se requiere más de una bomba manual para suministrar la misma cantidad de agua que un solo sistema de bombeo más potente que usa una fuente renovable de energía, deben tomarse en cuenta los costos de construcción de pozos adicionales para realizar la comparación. Estos costos pueden estimarse entre US\$150 y US\$250 por metro de profundidad del pozo.

Motores Diesel

El costo de capital de motores Diesel generalmente se estima en el rango de US\$500 a US\$1200 dólares por kW de capacidad nominal. Los costos de transporte terrestre, construcción de los cimientos y la instalación son adicionales. Se pueden conseguir motores Diesel confiables para sistemas de suministro de agua para comunidades pequeñas desde 3 kW de potencia máxima. La vida útil de un motor Diesel depende de la calidad de su fabricación y mantenimiento, y del número de horas de funcionamiento. Si no se tienen datos de campo, la vida útil de un motor Diesel puede ser estimada entre 8.000 y 15.000 horas o aproximadamente entre 4 y 5 años. Sin embargo, el mantenimiento inadecuado puede reducir su vida útil a menos de la mitad. El costo del combustible Diesel representa una alta proporción de los costos totales de su funcionamiento, y varía mucho de un país a otro, y aun dentro de un mismo país. Los impuestos nacionales y los costos adicionales por transporte generalmente llevan el precio de combustible Diesel al rango de US\$0.40 a US\$0.80 por litro. Los costos de mantenimiento y de reparación pueden ser estimados en un 20-25% de los costos de combustible, o sea entre US\$200 y US\$400 por cada mil horas de operación.

Motores eléctricos

El costo de capital para los motores eléctricos usados en pequeños sistemas de suministro de agua varía en el rango de US\$400 a US\$1000 por kW de potencia

máxima. Estos motores normalmente tienen una vida útil de 20.000 a 50.000 horas de operación. El mantenimiento y las reparaciones deben ser hechas por personas debidamente entrenadas, lo cual puede representar un problema en muchos países en desarrollo.

Los costos de funcionamiento incluyen los salarios de las personas responsables y los costos de energía eléctrica consumida, los cuales pueden ser aproximadamente US\$0.07 por kWh, aunque normalmente varían considerablemente de una región a otra. En muchos países, los costos de utilizar energía eléctrica en zonas rurales son insufragables. Sin embargo, la generación *in situ* de electricidad por sistemas fotovoltaicos solares o por generadores eléctricos movidos por el viento pueden aumentar el campo de acción para los motores eléctricos.

3.6 SISTEMAS DE BOMBEO QUE USAN FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA

Debido a la insuficiencia de los datos obtenidos a partir de pruebas de campo o ensayos de laboratorio, los datos de costos para equipos de bombeo que utilicen fuentes renovables de energía varían aún más que los datos para sistemas de bombeo convencionales.

Energía hidráulica

El equipo de bombeo de energía hidráulica representa sólo una pequeña proporción, usualmente del 25 al 30%, de la inversión inicial de capital del sistema total de suministro, porque ésta incluye los costos de las obras civiles, tales como presas, vertederos, líneas de conducción, plataformas y cimentaciones. Estos costos varían ampliamente, dependiendo de las condiciones del sitio. Los precios actuales para bombas de ariete hidráulico fabricadas en fundición comienzan en US\$700, y generalmente oscilan entre US\$1500 y US\$2500, dependiendo de su tamaño y la calidad de su fabricación. Algunas bombas de ariete pequeñas hechas en la localidad son mucho más baratas, costando entre US\$150 y US\$300. Sin embargo, el ahorro hecho al utilizar bombas de ariete de bajo costo fabricadas localmente, normalmente es muy pequeño en proporción al costo total. Las bombas de turbina chinas están costando entre US\$200 y US\$800 para los tamaños considerados en este libro, siendo relativamente baratas, pero las obras civiles requeridas, para su funcionamiento representan desde el 60 al 80% del costo total del sistema.

Los costos recurrentes para la operación y mantenimiento de las bombas movidas por energía hidráulica, generalmente son bajos porque no incluyen costos de combustible. Los únicos costos involucrados son los de la limpieza periódica del conducto de admisión del agua, ajustes ocasionales y mantenimiento menor.

Energía eólica

Las bombas eólicas de múltiples aspas, usadas para el suministro de agua potable, generalmente tienen un rotor con un diámetro que puede oscilar entre 2 y 6 m. Las bombas eólicas pueden conseguirse comercialmente, o pueden ser fabricadas en el país o localmente. Los rangos indicativos de costo por m² de área barrida por el rotor son:

- Bombas eólicas importadas US\$300-450/m²
- Bombas eólicas de tecnología intermedia US\$200-300/m²
- Bombas eólicas fabricadas localmente US\$100-150/m²

Los costos adicionales por embarque, transporte terrestre, impuestos y seguros aumentan el costo de capital, especialmente para equipo de bombeo eólico importado de los países industrializados. Los costos recurrentes de estas bombas son relativamente bajos. Para bombas eólicas de tecnología intermedia, la operación y el mantenimiento requieren de la atención diaria de personal local y del respaldo de un taller central, lo cual incrementa los costos recurrentes. Los costos recurrentes anuales para los tipos de bombas eólicas de construcción más sólida pueden estar en el rango de 3 al 6% de los costos de capital. Las bombas eólicas de bajo costo, fabricadas localmente son más susceptibles a daños y por lo tanto, requieren de mayor atención en su operación y mantenimiento, pero esto generalmente puede ser hecho localmente.

Energía solar fotovoltaica

Los sistemas de bombeo solares fotovoltaicos se consiguen comercialmente en paquetes que incluyen los paneles fotovoltaicos y el conjunto bomba-motor. El costo de capital indicado en la Tabla 3.4 muestra que el costo por Watio pico (Wp) decrece con el tamaño del sistema de bombeo fotovoltaico. Se espera que estos costos sean reducidos en el futuro, como resultado de mayores volúmenes de venta y la reducción de los costos de producción de las celdas solares. La fabricación o ensamble local también puede reducir los costos en algunos países. Debido a lo limitado de los datos de pruebas de campo, es difícil estimar los costos recurrentes de las bombas solares, originados por el pago de salarios al vigilante u operador del sistema, por su mantenimiento rutinario, por revisiones

Tabla 3.4: Indicación de costos de capital para bombas solares fotovoltaicas.

Clasificación	Tamaño del sistema de bombeo por tamaño del arreglo (Wp)	Rango de costos (US\$/Wp)
Pequeño	Menos de 500	20-25
Mediano	500 a 3.000	15-20
Grande	Más de 3.000	10-15

ocasionales hechas por grupos especiales de mantenimiento y por reparaciones mayores. El proyecto Banco Mundial/PNUD de bombas solares estima que estos costos son del orden de US\$50 anuales para mantenimiento del arreglo fotovoltaico y de US\$12 por cada mil horas de operación del conjunto bomba-motor.

Energía de la biomasa

El combustible producido por la conversión de la biomasa puede ser utilizado para suplir del 60 al 70% de los requerimientos de combustible Diesel en un sistema de bombeo movido por motor de combustión. El costo de capital de digestores para producción de biogas varía de US\$30 - 45 por m³ de volumen del digestor para una planta comercial, a US\$15 - 30 por m³ para digestores contruidos localmente, pero puede variar según los costos y condiciones locales. El equipo adicional para limpieza y almacenamiento del gas, la tubería y accesorios, pueden aumentar en un 10 al 15% los costos del digestor. Los costos recurrentes dependen del sitio, y consisten principalmente en costos por mano de obra y de la fuente de biomasa. Los costos anuales para reparación y mantenimiento pueden estimarse en un 5 al 10% de los costos de capital.

Un número de factores adicionales complican el análisis de costos para sistemas de bombeo que emplean energía de la biomasa. Se requiere de la participación de la comunidad en cuanto ella puede hacer aportes en términos de tiempo y esfuerzo, cuyo costo es difícil estimar. Los beneficios tales como la prevención de enfermedades parasitarias y microbiales y la obtención de fertilizante para la producción de alimentos, tampoco son fácilmente reflejados en el análisis de costos.

Los costos de capital dominan la economía de la utilización de los gasificadores para producción de combustible. Donde se puedan suministrar gasificadores por menos de US\$200 por kW de capacidad, como es ahora el caso de Brasil y las Filipinas, ellos son competitivos con motores convencionales Diesel. Los gasificadores que cuestan más de US\$400 por kW de capacidad, como es el caso con sistemas importados de Europa o Norte América, raramente son económicos. Otros factores que afectan el análisis de costos son el costo del combustible Diesel que se está reemplazando, la carga de operación, la vida útil del equipo, y los costos de compra de biomasa seca. Los costos de operación y mantenimiento son relativamente altos, pero no se pueden especificar por falta de datos.

En la actualidad generalmente se acepta que la producción de etanol no es un sustituto económicamente viable para el combustible Diesel. El costo unitario del etanol usualmente es sustancialmente más alto que el del combustible Diesel, dependiendo de los costos locales, tales como el rendimiento de los cultivos por hectárea, y de las condiciones de proceso en la destilería. Los costos de establecer destilerías son mucho mayores que la capacidad financiera de las comunidades rurales y requieren de financiamiento a nivel nacional. Cálculos de costos para destilerías en Brasil muestran que los costos del alcohol producido a partir de la yuca y de la caña de azúcar están en el rango de US\$0.35 a US\$0.45 por litro, lo

cual es más alto que el precio corriente del combustible Diesel en ese país. Cuando es subsidiada por programas nacionales, la producción de alcohol puede ser ligeramente más barata.

3.7 TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Debido a la variación diaria y estacional de la disponibilidad de las fuentes renovables de energía, es necesario proyectar un sistema para el almacenamiento de agua de tal manera que se asegure un suministro continuo y confiable con los sistemas de bombeo que utilizan estas fuentes de energía. El almacenamiento de agua bombeada casi siempre es más barato que el almacenamiento de la cantidad equivalente de energía eléctrica en baterías. La Tabla 3.5 da una indicación de la capacidad de almacenamiento requerida para varios tipos de sistemas de bombeo. La Tabla 3.6 muestra los costos para diferentes tipos de tanques.

Tabla 3.5: Indicación de los requerimientos de almacenamiento de agua para varios tipos de sistemas de bombeo.

Tipo de sistemas de bombeo	Almacenamiento (días)
Hidráulico	1 a 2
Eólico	5 a 7
Solar fotovoltaico	2 a 4
Combustión de biomasa	1 a 2
Diesel	1 a 2
Eléctricas	1 a 2
Manuales	0

Tabla 3.6: Costos indicativos de varios tipos de tanques de almacenamiento de agua.

Tipos de tanques de almacenamiento	Costo por m ³ (US\$)
Excavación en tierra con revestimiento	5 a 10
Tierra compacta con revestimiento	8 a 20
Ladrillo con revestimiento de cemento	12 a 25
Ferrocemento	15 a 30
Concreto	20 a 30
Acero	60 a 80

3.8 COMPARACION DE COSTOS

A continuación se hace una comparación de costos para una bomba eólica, una bomba solar, y una bomba Diesel en lugar específico, para el cual se asumen las condiciones locales, consignadas en la Tabla 3.7. Los sistemas de bombeo de energía renovable se comparan con la bomba Diesel porque gran parte del interés actual en sistemas de energía renovable se debe al alto costo y los problemas logísticos de suministro del combustible Diesel. Debe hacerse énfasis en la alta incidencia de los valores asumidos para los parámetros claves, en los resultados obtenidos.

Tabla 3.7: Comparación de costos de bombas de agua, bombas solares y bombas diesel de un sitio en particular.

DATOS DEL SITIO:	
Requerimientos de agua	27 m ³ /d
Cabeza de bombeo	30 m
Velocidad promedio anual del viento	4 m/s
Longitud crítica de períodos de calma	5 días
Irradiación promedio mensual (en el mes crítico)	14 MJ/m ² d (4kWh/m ² d)
Longitud crítica de períodos de nubosidad	3 días
Tamaño mínimo de motor diesel que se consigue	3 kW máximos
Costo de una bomba Diesel de 3 kW máximos	US\$4.500
Precio del combustible Diesel	US\$0.50/litro
Costo de la bomba eólica	US\$350/m de área barrida por el rotor
Costo del sistema de bombeo solar fotovoltaico	US\$22/Wp instalado
Costo unitario del tanque de almacenamiento	US\$30/m ³
Tasa de descuento	8%

El procedimiento para el cálculo del costo unitario para cada sistema de bombeo es el siguiente:

- 1) Calcule la energía hidráulica de bombeo (kWh/d) basado en la cabeza de descarga (m) y la cantidad de agua bombeada (m³/d). (Sección 4.3).
- 2) Calcule el tamaño del sistema de bombeo requerido y su costo de capital.
- 3) Seleccione el tamaño adecuado de tanque de almacenamiento (m³), y calcule el costo de capital (\$). (Sección 3.7).
- 4) Estime la vida útil del sistema de bombeo (años). (Sección 3.6).

- 5) Calcule el costo de capital equivalente anual (\$/año) para el sistema de bombeo y el tanque de almacenamiento, usando la tasa de descuento apropiada.
- 6) Estime los costos recurrentes anuales (\$/año). (Sección 3.4).
- 7) Sume los valores de los pasos 5 y 6 para determinar el costo total anual (\$/año).
- 8) Divida por 365 para hallar los costos totales diarios (\$/día).
- 9) Divida por la cantidad de agua bombeada diariamente ($\text{m}^3/\text{día}$) para hallar el costo por m^3 de agua bombeada (\$/ m^3).
- 10) Divida por la energía hidráulica entregada diariamente ($\text{kWh}/\text{día}$) para hallar el costo por kWh de energía hidráulica producida (\$/kWh).

Cálculo de costos: bomba diesel

Requerimiento de energía hidráulica entregada	2.25 kWh/d
Tamaño del motor diesel	(Motor más pequeño que se consigue) 3 Kw potencia máxima
Costo de capital de la bomba diesel	US\$4.500
Potencia nominal suministrada	2 kW
Eficiencia de la bomba	40%
Potencia hidráulica suministrada por el motor	0.8kW
Caudal del agua	4.1 lts/s
Horas de operación requeridas por día	1.83 horas
Eficiencia del motor	15%
Consumo de combustible por hora de operación	1.34 de diesel/hora
Combustible consumido por año	895 litros/año
Capacidad del tanque de almacenamiento	Suministro de un día = 27m^3
Costo de capital del tanque	US\$810
Vida útil del tanque	20 años
Vida útil del motor	5 años
Vida útil de la bomba	10 años
Costos de capital en una base anual:	
Motor y bomba	US\$960
Tanque	US\$95
Costos anuales de combustible	
895 litros a US\$0.50 por litro	US\$450
Costos anuales de operación y mantenimiento:	
Motor y bomba (5% de costo capital)	US\$225
Tanque (2% del costo de capital)	US\$ 15
Costo anual del operador	US\$500
Costo total anual	US\$2.240
Agua producida por año	9850 m^3
Costo unitario por m^3	US\$0.23/ m^3

Cálculo de costos: bomba eólica

Requerimiento de energía hidráulica entregada	2.25 kWh/d = 821 kWh/año
Área barrida por el rotor	821 : 0.9 V ³
Energía hidráulica 0.9 V ³	14.25 m ²
Costo de capital de la bomba eólica	14.25 x 350 = US\$5.000
Vida útil de la bomba eólica	15 años
Capacidad del tanque de almacenamiento	5 + 1 = suministro de 6 días = 160 m ³
Costos de capital del tanque	US\$4.800
Vida útil del tanque	20 años
Costo de capital en una base anual:	
Bomba eólica	US\$650
Tanque	US\$560
Costos anuales de operación y mantenimiento:	
Motor y bomba (5% de costos de capital)	US\$250
Tanque (2% del costo de capital)	US\$100
Costo total anual	US\$1.560
Agua producida por año	9.850 m ³
Costo unitario por m ³ bombeado	US\$0.16/m ³

Cálculo de costos: bomba fotovoltaica

Requerimiento de energía hidráulica entregada	2.25 kWh/d
Eficiencia del motor y la bomba	40%
Requerimiento de energía eléctrica	5.63 kWh/d
Tamaño en Watios pico del sistema	1.700 Wp
Costos de instalación del sistema de bombeo solar	1.700 x US\$22/Wp = US\$15.400
Vida útil de la bomba solar	15 años
Capacidad del tanque de almacenamiento	3 + 1 suministro de 4 días = 110 m ³
Costo de capital del tanque	US\$3.300
Vida útil del tanque	20 años
Costos de capital en una base anual:	
Bomba solar	US\$2.010
Tanque	US\$ 560
Costos anuales de operación y mantenimiento:	
Motor y bomba (2% de costo de capital)	US\$ 310
Tanque (2% del costo de capital)	US\$ 65
Costo total anual	US\$2.775
Agua producida por año	9.850 m ³
Costo unitario por m ³	US\$0.28/m ³

El resultado de esta comparación muestra que la bomba eólica sería la solución más efectiva en costos para la situación dada. En una forma similar se puede hacer una comparación de costos cubriendo el rango de condiciones locales predominantes en una región o país. Los rangos de costos resultantes de este análisis servirán de guía para seleccionar la tecnología más aconsejable.

3.9 EFECTO DE LAS SUPOSICIONES HECHAS SOBRE LOS RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE COSTOS

Cuando se realiza un análisis comparativo de costos, las suposiciones hechas afectan los resultados considerablemente. Ejemplos de suposiciones que deben ser revisadas antes de usarlas en análisis comparativos de costos son: el precio del combustible Diesel, el precio del equipo de bombeo solar, la velocidad promedio anual del viento, y los costos de transporte.

Si es difícil obtener estos valores, o un valor en particular no es muy seguro, entonces los análisis de costos normalmente se hacen usando diferentes valores para mostrar qué tan sensibles son los costos unitarios calculados los cambios en estas suposiciones. Esto se llama análisis de sensibilidad. Para ilustrar esto, las suposiciones sobre el costo del combustible Diesel y la velocidad promedio anual del viento en el ejemplo presentado en la Sección 3.8 han sido variadas. Si el precio del combustible Diesel es aumentado de US\$0.50 por litro a US\$0.85 por litro, el costo unitario por m^3 de agua bombeada para una bomba Diesel aumenta ligeramente de US\$0.23 a US\$0.27. Un cambio considerable en el precio del combustible Diesel tiene un efecto relativamente bajo en el costo unitario del agua bombeada, en este ejemplo. Sin embargo, si la velocidad promedio anual del viento no es 4 m/seg. sino 3m/seg., se requeriría un rotor mucho mayor, y de esta forma el costo de capital de la bomba eólica aumentaría considerablemente. El área barrida por el rotor sería aproximadamente mayor en $34m^2$ y el costo de capital unos US\$12.000 más. Los costos equivalentes anuales aumentarían en US\$1.420, y los costos de operación y mantenimiento en US\$590. Los costos unitarios por m^3 de agua bombeada aumentarían de US\$0.16/ m^3 a US\$0.27/ m^3 .

Estos análisis de sensibilidad son complicados, particularmente cuando hay muchas variables involucradas, y se puede requerir del procesamiento de datos por computador. Se recomienda consultar a un especialista, en caso de requerirse un análisis de sensibilidad completo.

BIBLIOGRAFIA

- BUCH-LARSEN, B., and MUELLER, A.M. (1982). An economic-comparison of the use of wind pumps and kerosene pumps for irrigation in Sri Lanka. Colombo, Sri Lanka, Water Resources Board; Wind Energy Unit.
- CAROTHERS, R. (1981). An assessment of water-pumping technologies using locally available energy resources: Botswana. In rural water supply in developing countries, proceedings of a training workshop held in Zomba, Malawi, 5-12 August 1980. Ottawa, Canada, International Development Research Centre, 44-52.
- FRAENKEL, P.L. (1980). The relative economics of wind pumps compared with enginedriven pumps. Reading, UK, Intermediate Technology Power Ltd.
- FRENCH, D. (1979). The economics of renewable energy systems for developing countries. Washington, DC, USA, US Agency for International Development.
- GINGOLD, P.R. (1979). The cost-effectiveness of water pumping windmills. *Water Engineering*, 3, 4, 262-331.
- LYSEN, E.H. (1982). Introduction to wind energy (CWD Publication 82-3). Amersfoort, The Netherlands, Consultancy Services Wind Energy Developing Countries.
- MARCHESINI, L., and POSTMA, S.F. (1978). Cost comparison of wind pumps and engine pumps. Amersfoort, The Netherlands, Steering Committee Wind Energy Developing Countries.
- MUELLER, A.M., and JANSEN, W.A.M. (1984). Cost analysis of water-lifting windmills an Diesel-powered pumps used for small-scale irrigation (CWD Publication 84-3). Amersfoort, The Netherlands, Consultancy Services Wind Energy Developing Countries.
- NORCONSULT (1985). Solar-powered water pumps in rural townships in Tanzania (final report). Sandrika, Norway, Norconsult Consulting Engineers.
- SAIF-UL-REHMAN, M. (1978). Comparative costs of water pumping with solar energy, windpower, petrol engine and electric water pump. In Sun: mankind's future source of energy, Vol. 3. Proceedings of the International Solar Energy Society Congress, New Delhi, India.
- SIR WILLIAM HALCROW & PARTNERS/INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP (1981). Small-scale solar-powered irrigation pumping systems: technical and economic review (Document 232,4/81 SM). Washington, DC, USA, World Bank.
- WISEMAN, R. (1983). Sun pumps may soon compete with hand pumps. *World Water*, 6, 9, 25-31.

4. *Nociones básicas de bombeo y selección de bombas*

Los tipos de bombas más comúnmente usados en sistemas rurales de abastecimiento de agua son bombas de desplazamiento positivo tales como bombas de pistón, y bombas rotodinámicas tales como bombas centrífugas. El tipo de bomba debe ser seleccionado cuidadosamente para que se conjuga con el aparato que la mueve. Por consiguiente, la selección debe estar basada en la consideración de:

- Capacidad de bombeo requerida
- Características de la fuente de agua
- Requerimiento de potencia y eficiencia de bombeo
- Requerimiento de mantenimiento y reparación

4.1 ESPECIFICACION DE LA CAPACIDAD DE BOMBEO

El primer paso en la selección del tipo de bomba es la especificación de la capacidad de bombeo requerida en términos del caudal y la cabeza de bombeo.

Capacidad de bombeo

En este libro, se consideran sistemas de bombeo con capacidad de bombeo de hasta 200 m³/día. El suministro de agua requerido, en m³/hora, se calcula basado en la cantidad máxima diaria de agua requerida y el número diario de horas de operación.

La cantidad máxima de agua requerida diariamente no es igual a la demanda de agua de la comunidad. Por ejemplo, para un sistema de bombeo eólico en una localidad en donde ocurran periodos de viento insuficiente, durante tres días seguidos, se requiere un reservorio de almacenamiento de por lo menos tres veces la demanda de agua diaria. Para volver a llenar este reservorio después de un periodo sin viento, se requiere bombear más agua que la demanda diaria. Este es el requerimiento máximo diario, y la bomba debe tener una capacidad suficiente para proveer agua a esa tasa.

Algunos tipos de sistema de bombeo están diseñados para operar continuamente, otros tipos pueden suministrar la cantidad de agua requerida en un par de horas al día. Los factores que determinan el número de horas de operación diaria incluyen el tipo de suministro de energía, los requerimientos del mantenimiento, y el tamaño mínimo que se consigue para el sistema de bombeo seleccionado. La capacidad de bombeo de la bomba Diesel más pequeña que se consigue comercialmente, es suficientemente grande para suministrar los requerimientos

diarios de la mayoría de las comunidades rurales en un par de horas de operación. Para bombas eléctricas, la capacidad de bombeo requerida dependerá del número de horas por día durante las cuales hay suministro eléctrico, el cual en muchos países está limitado, en algunas ocasiones a un par de horas por la tarde o noche. Las bombas hidráulicas pueden operar continuamente, y la capacidad de bombeo por hora requerida puede ser calculada dividiendo el requerimiento máximo diario por 24. Sin embargo, es aconsejable seleccionar una bomba ligeramente mayor, porque el número real de horas diarias de operación puede ser menor por limitaciones operacionales. En principio, las bombas eólicas también pueden operar continuamente, pero debido a la variación de la velocidad del viento de un día a otro, la capacidad de bombeo debe ser lo suficientemente grande para bombear una cantidad suficiente de agua en días de buen viento para tener una reserva para los períodos de vientos insuficientes. Las bombas solares pueden operar durante la mayoría de las horas de sol, así que su capacidad de bombeo debe ser suficiente para suministrar el requerimiento máximo de agua en seis a ocho horas.

Ejemplo:

La demanda máxima de una comunidad rural se estima en $48 \text{ m}^3/\text{día}$, y el requerimiento máximo diario de agua para esta comunidad es de $60 \text{ m}^3/\text{día}$. De esta forma un sistema solar de bombeo diseñado para seis horas de operación por día debe tener una capacidad de bombeo de $10 \text{ m}^3/\text{hora}$. Para una bomba hidráulica diseñada para 20 horas de operación por día, la capacidad de bombeo promedia requerida sería de $3 \text{ m}^3/\text{hora}$.

Cabeza de bombeo

La cabeza total de bombeo para la cual debe diseñarse el sistema tiene los siguientes componentes (Figura 4.1):

- Elevación estática, esto es, la distancia vertical entre el nivel estático del agua de la fuente (como por ejemplo un pozo), y el nivel al cual debe ser entregada el agua en descarga libre (por ejemplo, en un tanque elevado);
- Cabeza de fricción, esto es, las pérdidas de cabeza causadas por fricción y turbulencia del agua al fluir por la tubería, válvulas y accesorios;
- Abatimiento, esto es, la reducción del nivel del agua en la fuente causado por su extracción;
- Provisión adicional de cabeza, para tener en cuenta un posible aumento en la cabeza de fricción con el transcurso de tiempo, o una reducción en el nivel freático.

La mayoría de tipos de bombas están diseñadas para impulsar el agua y deben localizarse en el pozo para que puedan operar sumergidas en el agua, aun cuando el nivel del agua esté en su punto más bajo. Las bombas de succión deben ser usadas únicamente cuando pueden ser emplazadas a menos de 6 m del nivel mínimo de agua posible de la fuente, porque no pueden trabajar confiablemente a una mayor cabeza de succión; la mayoría de las bombas de succión deben ser

cebadas, esto es, el cuerpo de la bomba tiene que ser llenado con agua antes de que se pueda operar la bomba.

La cabeza total de bombeo bajo condiciones de operación usualmente se llama cabeza dinámica. Cuando el agua es bombeada a una tasa muy baja, la cabeza total de bombeo puede ser asumida igual a la de la elevación estática. A

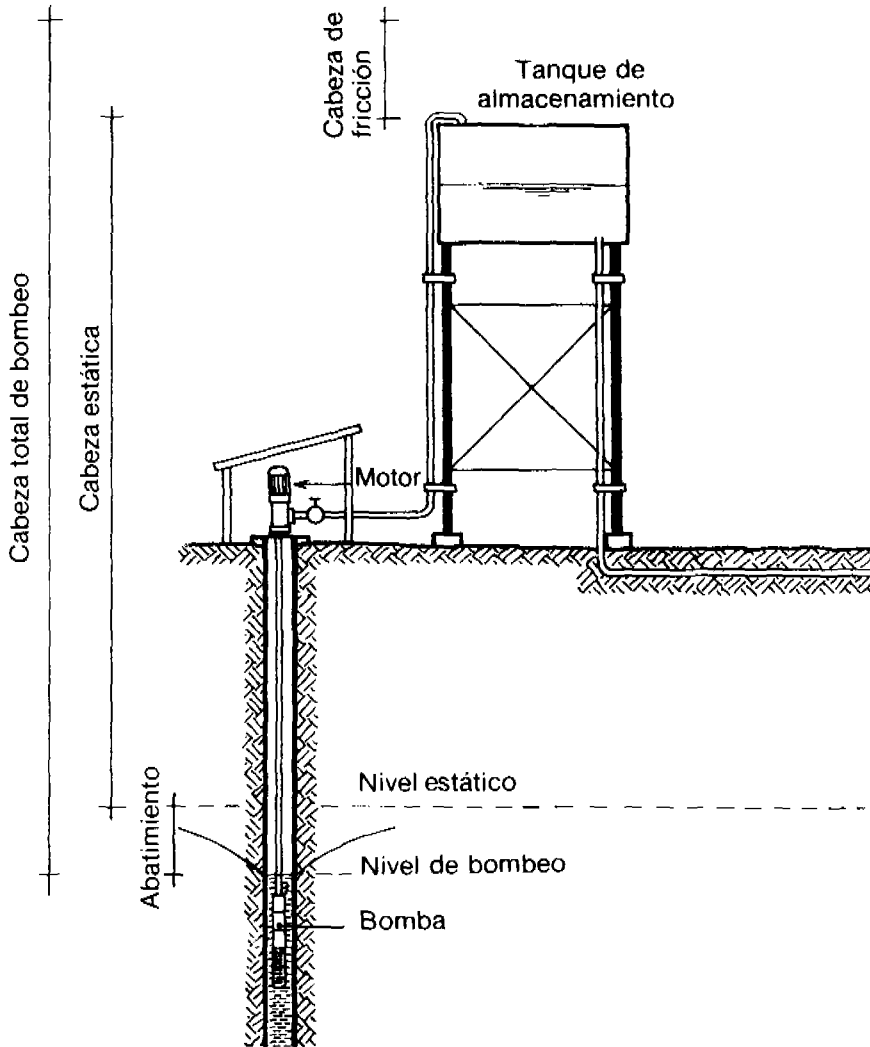


Figura 4.1: Componentes de la cabeza total de bombeo.

mayores tasas de bombeo, las pérdidas de cabeza causadas por fricción y turbulencia del flujo aumentarán y aumentará consecuentemente la cabeza de bombeo. Como se dijo anteriormente, es prudente para propósitos de diseño incluir en la cabeza total de bombeo una provisión para una cabeza de fricción mayor o una declinación del nivel freático.

4.2 CARACTERISTICAS DE LA FUENTE DE AGUA

Producción sostenida y abatimiento

La producción sostenida de la fuente de agua es un factor esencial en la selección de la bomba, porque está íntimamente relacionado con el abatimiento durante el bombeo (ver Figura 4.2). Si la producción del acuífero es poca, una bomba de alta capacidad puede causar un abatimiento excesivo, o inclusive puede secar el pozo. Se deben realizar pruebas de bombeo para determinar la producción sostenida del acuífero. Si la producción es pequeña, debe seleccionarse una bomba de capacidad limitada.

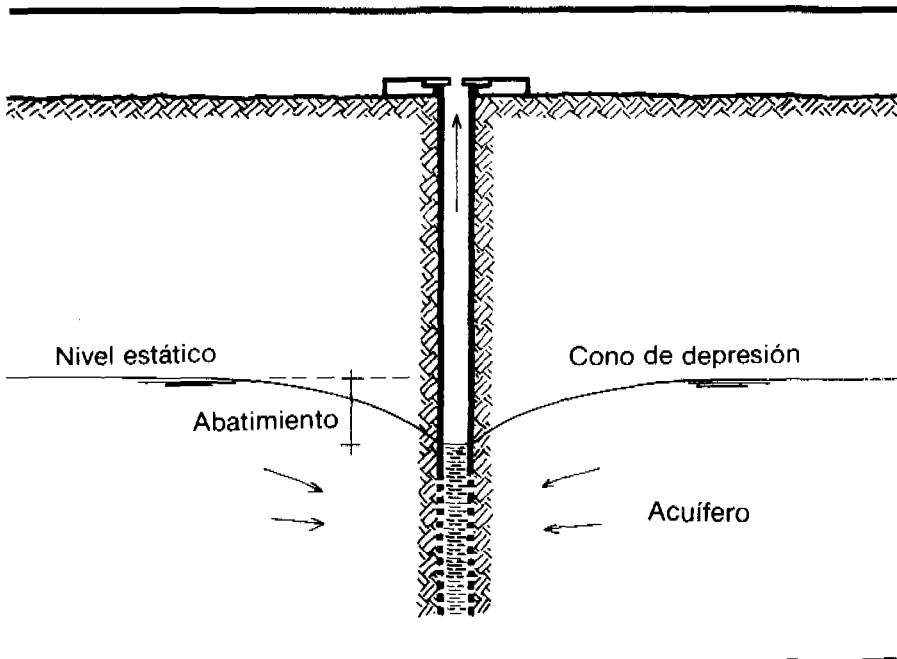


Figura 4.2: Efecto de abatimiento causado por la extracción de agua de un pozo (AWWA, 1984).

Calidad del agua

La calidad del agua también debe ser considerada en la selección de la bomba. Si el agua es corrosiva, entonces deben seleccionarse bombas construidas de materiales resistentes a la corrosión. Si el agua bombeada tiene un alto contenido de hierro y manganeso, se pueden depositar precipitados en las aperturas de la bomba y en sus partes internas, y se deben seleccionar bombas que no sean afectadas por estos depósitos. Los carbonatos de calcio y magnesio pueden precipitarse del agua y causar un taponamiento de los orificios de entrada de la bomba y de su interior. Por consiguiente, se requiere la inspección regular y la limpieza de las partes internas de la bomba en condiciones en las cuales estos precipitados y el taponamiento de la bomba puedan ocurrir.

4.3 REQUERIMIENTOS DE POTENCIA Y EFICIENCIA DE BOMBEO

La potencia efectiva de salida o la potencia hidráulica de salida para bombear agua a una tasa dada (Q) y una cabeza de bombeo (H) es igual a el producto $\rho_w \cdot g \cdot Q \cdot H$. La potencia efectiva entregada por un sistema de bombeo será menor que la potencia que se le suministra, debido a las pérdidas que ocurren en la conversión de potencia en el motor, en la transmisión, y en la bomba misma. La razón entre la potencia de salida y la potencia de entrada es llamada eficiencia del sistema de bombeo (η). De esta forma el requerimiento de potencia (P) para el bombeo de agua puede ser calculado según la relación:

$$P = \frac{\rho_w \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta}$$

Para un peso específico del agua (ρ_w) de 1.0 Kg/l y una constante gravitacional (g) de 9.8 m/s², esta relación puede ser simplificada a:

$$P = \frac{9.8 \cdot Q \cdot H}{\eta}$$

Donde:

- P = requerimiento de potencia (W)
- Q = caudal de bombeo (l/s)
- H = cabeza total de bombeo (m)
- η = eficiencia global (decimal)

Ejemplo:

Se diseña un sistema de bombeo para una capacidad de bombeo de $60 \text{ m}^3/\text{día}$ a una cabeza total de 10 m , y para 6 horas de operación por día. La capacidad de bombeo requerida es de $10 \text{ m}^3/\text{hora}$, o 2.78 l/s . La potencia hidráulica requerida para esta capacidad de bombeo es calculada como $9.8 \times 2.78 \times 10 = 272 \text{ W}$. Si la eficiencia de la bomba es del 60% , entonces el requerimiento de potencia a suministrarse a la bomba es $272/0.6 = 453 \text{ W}$. Si la bomba es impulsada por un motor con una eficiencia promedio del 70% en el rango de operación, entonces la potencia que debe suministrarse al motor deberá ser $453/0.7 = 647 \text{ W}$. La eficiencia global de este sistema es $272/647 \times 100 = 42\%$.

La eficiencia con la cual una bomba convierte la potencia mecánica que le es transmitida a potencia hidráulica depende de su diseño y configuración, y de las condiciones bajo las cuales opera. Para bombas recíprocas, la eficiencia de operación no es muy afectada por el caudal y la cabeza de bombeo, y usualmente está en el rango de 60 al 75% . Para las bombas centrífugas, existe una gran dependencia de la eficiencia sobre la combinación de caudal y cabeza de bombeo bajo la cual opera, pudiendo variar grandemente, del 25 al 85% . La eficiencia de operación de bombas centrífugas para cada combinación de caudal y cabeza puede ser medida y mostrada gráficamente en una curva de operación de la bomba. Este tipo de gráficas, como por ejemplo, aquella presentada en la Figura 4.3, es suministrado por la mayoría de fabricantes.

La pendiente negativa de la curva caudal contra cabeza, en sentido de izquierda a derecha, indica que el caudal es mayor para menores cabezas de

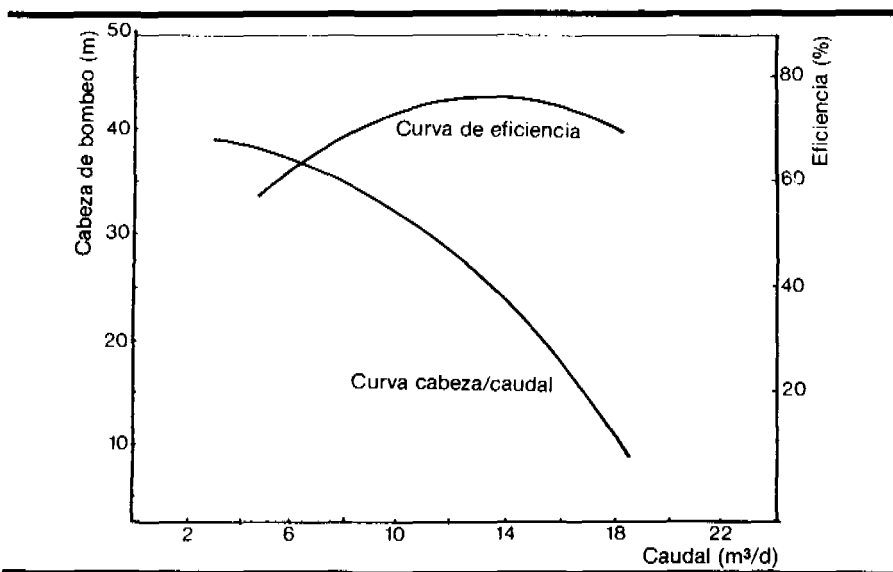


Figura 4.3: Curvas de operación para una bomba centrífuga.

bombeo. Como muestra la figura, la eficiencia de bombeo varía considerablemente para diferentes caudales. Se consigue una eficiencia alta sólo en el rango relativamente pequeño de caudal de 12 a 16 m³/d. Para caudales menores de 12 m³/d, o mayores de 16 m³/d, la eficiencia es considerablemente menor. Para una eficiencia razonable, es necesario seleccionar una bomba centrífuga específicamente para la cabeza y caudal bajo los cuales operará.

4.4 REQUERIMIENTOS DE MANTENIMIENTO Y REPARACION

Los requerimientos de mantenimiento y reparación son consideraciones importantes en la selección de una bomba. Los factores a considerar incluyen la frecuencia de revisión y mantenimiento, y los conocimientos, herramientas, y repuestos requeridos. La experiencia demuestra que los sistemas de bombeo de agua frecuentemente fallan por mantenimiento inadecuado y falta de repuestos. Muchas veces pasa un largo período de tiempo antes de que se haga la reparación y como consecuencia, los sistemas de bombeo pueden ser completamente abandonados por la comunidad usuaria. Siempre se requiere un servicio de respaldo, el cual incluye un suministro de repuestos, el entrenamiento de los operarios de las bombas, y el apoyo técnico.

Todas las bombas se desgastan con el tiempo, pero si hay limos o arenas presentes en el agua bombeada, la durabilidad y la vida útil de la mayoría de las bombas es considerablemente más corta. El desgaste excesivo de las bombas muchas veces es más una indicación de un diseño inapropiado del pozo que de una fabricación defectuosa de la bomba.

4.5 TIPOS DE BOMBAS

Los tipos de bombas usados primordialmente en sistemas de bombeo a pequeña escala caen en dos categorías principales:

- Bombas de desplazamiento positivo
- Bombas rotodinámicas (de impulsor)

Bombas de desplazamiento positivo

Bombas reciprocantes de pistón. Estas bombas tienen un pistón que se mueve hacia arriba y abajo dentro de un cilindro cerrado. Cuando el pistón sube, eleva el agua, y al mismo tiempo, debido a una reducción de presión debajo del pistón se succiona agua por la válvula de admisión. Cuando el pistón baja, se cierra la

válvula de admisión y el agua es forzada a través de la válvula de salida (Figura 4.4).

Las bombas de pistón son autocebantes cuando el cilindro está cerca o debajo del nivel de la fuente. En cada ciclo, se desplaza la misma cantidad de agua. De esta forma, la tasa de bombeo está gobernada principalmente por la velocidad de bombeo, esto es, el número de ciclos por minuto a los cuales opera la bomba. La cabeza de bombeo tiene muy poco efecto en el caudal de estas bombas. Las bombas de pistón de efecto sencillo producen bombeo únicamente durante la carrera de subida del pistón, y las bombas de pistón de doble efecto tanto durante la carrera de subida como durante la carrera de bajada del pistón.

Las bombas reciprocantes de pistón deben ser consideradas especialmente para el bombeo de agua de pozos de profundidad mediana o grande con el nivel dinámico del agua a una profundidad de 20 a 40 mts., o si fuera necesario, hasta 60 mts. Pueden dar un desempeño confiable con eficiencias del 60 al 75%, la cual no es muy afectada por variaciones en la cabeza de bombeo. El uso de este tipo de bombas está limitado a profundidades de 60 mts., porque las varillas del pistón de una longitud mayor son susceptibles de flexionarse y quebrarse.

Las bombas de pistón requieren una fuerza relativamente alta para arrancar. Para sobreponerse a este problema, se puede incorporar un mecanismo de embrague el cual permite que el motor gane velocidad y potencia sin carga hasta que haya desarrollado la fuerza de arranque requerida por la bomba. Esto reduce el torque de arranque que debe ser suministrado por el motor, y por consiguiente,

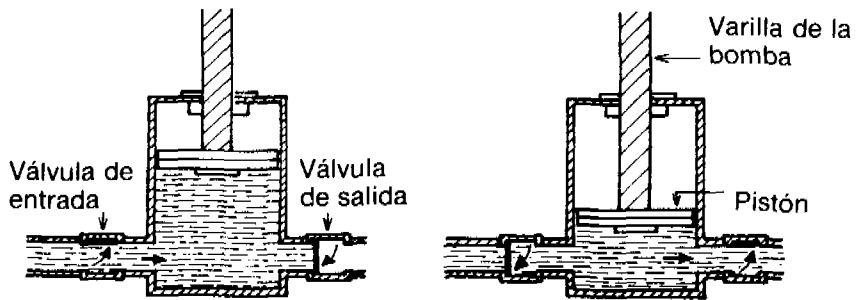


Figura 4.4: Principio de operación de una bomba reciprocante de pistón.

tiene implicaciones en el diseño. Por ejemplo, para una bomba eólica equipada con embrague, puede ser adecuado un rotor con 6 aspas, pero sin el embrague probablemente necesitaría un rotor de 16 o 24 aspas. Un método alternativo para reducir la fuerza de arranque de bombas de pistón, es de hacer una pequeña perforación en el pistón. La carga variable que el pistón recíprocante ejerce en el mecanismo de impulso y en la fuente motriz es otro problema. La velocidad de operación de estas bombas debe ser mantenida baja, rara vez más de 50 ciclos por minuto, para limitar la frecuencia y el efecto del cambio de cargas sobre el sistema de bombeo.

Bombas de diafragma. La parte esencial de este tipo de bomba es el diafragma, hecho de caucho resistente, lámina metálica, o un material flexible similar. El diafragma está fijado a los bordes de la cámara de la bomba (fig 4.5). Se fijan válvulas de retención en la entrada y la salida de la cámara de la bomba. Cuando el diafragma es alzado, se succiona agua, y cuando el diafragma es bajado, el agua es forzada fuera de la cámara de la bomba.

Las bombas de diafragma son autocebantes si están localizadas cerca o debajo del nivel de agua en la fuente. Tienen la ventaja de que la fricción interna es baja porque en ellas no existe la fricción entre el sello del pistón y la cámara de la bomba, como ocurre en el caso de la bomba recíprocante de pistón. Las partículas de arena pueden pasar a través de la bomba en el agua bombeada sin causar daños.

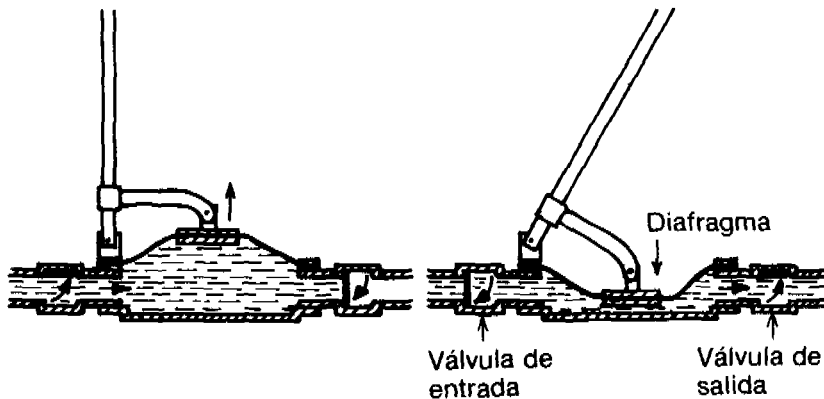


Figura 4.5: Principio de operación de una bomba de diafragma.

Debido a su diseño simple, se espera que las bombas de diafragma ganen popularidad en sistemas de bombeo a pequeña escala, pero hasta la fecha, sólo han tenido un uso limitado.

Bombas rotatorias helicoidales. Estas bombas tienen un rotor helicoidal (en espiral), generalmente fabricado en acero inoxidable, el cual rota al interior de un estator helicoidal hecho de caucho resistente a la abrasión. Cuando el rotor gira, las superficies helicoidales en contacto fuerzan el agua hacia arriba por un desplazamiento positivo en un flujo continuo. El caudal es proporcional a la velocidad de rotación, y por consiguiente puede ser variado fácilmente. No se requieren válvulas en este tipo de bomba, porque el rotor y el estator proveen un sello continuo contra la devolución del agua (Figura 4.6).

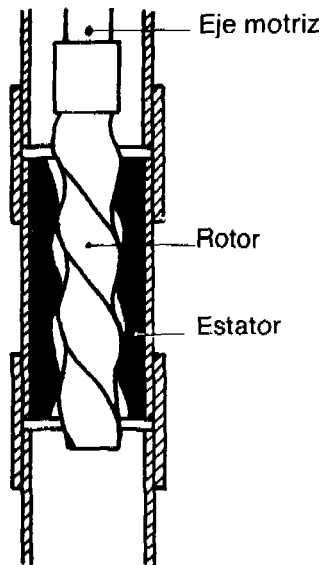


Figura 4.6: Partes principales de una bomba rotatoria helicoidal.

Las bombas rotatorias helicoidales son autocebantes cuando operan debajo del agua. Pueden trabajar contra un rango amplio de cabezas, pero su eficiencia es limitada para cabezas mayores. Estas bombas pueden tolerar pequeñas cantidades de limo o de arena fina en el agua bombeada, sin daños o desgaste mayor.

Bombas rotodinámicas (de impulsor)

Bombas centrífugas. Estas bombas operan con el principio de impartir energía cinética al agua, y por consiguiente no trabajan por el desplazamiento positivo del agua. Tienen uno o más impulsores, los cuales rotan dentro de una carcasa de forma especial. Cada impulsor y su carcasa correspondiente es llamado una etapa (Figura 4.7). El impulsor tiene un número de aletas que radian desde el centro a su periferia, las cuales a una velocidad alta de rotación expelen el agua radialmente por fuerza centrífuga, impartiendo energía cinética a ella de esta forma. La carcasa tiene forma tal que la mayor parte de la energía cinética es convertida a una presión utilizable, la cual entonces impulsa el agua contra la cabeza de bombeo. El agua impulsada es reemplazada por agua que entra por el centro (ojo) del impulsor.

Si se requiere mayor presión de la que puede producir una etapa sencilla, se pueden poner etapas adicionales en serie para formar una bomba multi-etapa. Todos los impulsores están montados sobre un eje común, y por consiguiente

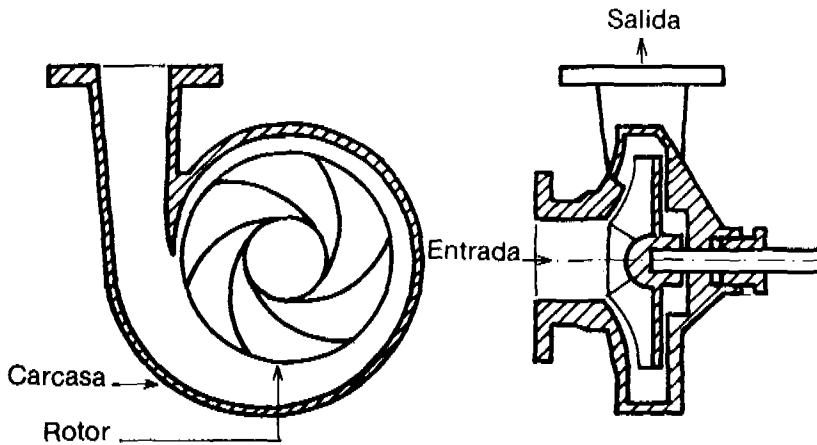


Figura 4.7: Etapa de una bomba centrífuga.

tienen la misma velocidad de rotación. A medida que el agua pasa a través de las etapas sucesivas, se aumenta la presión para dar la cabeza de bombeo requerida.

Bombas sumergibles. Estas bombas son bombas centrífugas multietapas las cuales están fabricadas en una unidad juntas con un motor eléctrico. El motor y la bomba son de una construcción esbelta de forma tal que puedan ser bajados en el pozo para operación sumergida (Figura 4.8). Estas bombas muchas veces caben estrechamente en el pozo, siendo su diámetro sólo de 1 a 2 cms. menor que el diámetro interno del pozo. En consecuencia, se requiere sumo cuidado al instalar o remover este tipo de bomba.

En las bombas sumergibles, el motor recibe energía eléctrica a través de un cable desde la fuente de potencia. Como ellas tienen que ser muy esbeltas, estos conjuntos de bomba y motor generalmente son menos eficientes que las bombas montadas en superficie. Sin embargo, su eficiencia global frecuentemente es

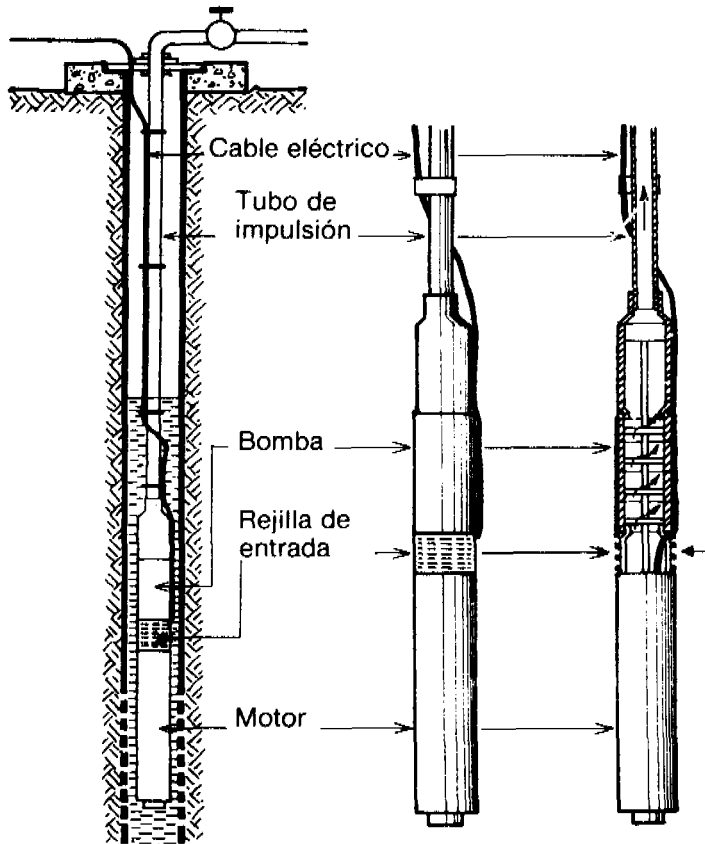


Figura 4.8: Bomba sumergible.

mayor que para bombas movidas por un motor montado en la superficie porque no tienen las pérdidas de potencia considerables del eje impulsor. El mantenimiento y la reparación son costosos, especialmente en pozos muy profundos, porque la totalidad del tubo de impulsión debe ser desmontado para sacar el conjunto bomba-motor a la superficie.

Bombas de turbina de pozo profundo. Aunque son usualmente consideradas como un tipo de bomba centrífuga su modo de operación es ligeramente diferente, porque el agua es elevada por una combinación de desplazamiento positivo y acción centrífuga. Estas bombas pueden ser fácilmente reconocidas por sus unidades distintivas en forma de taza con pasajes largos y esbeltos entre ellos (ver Figura 4.9).

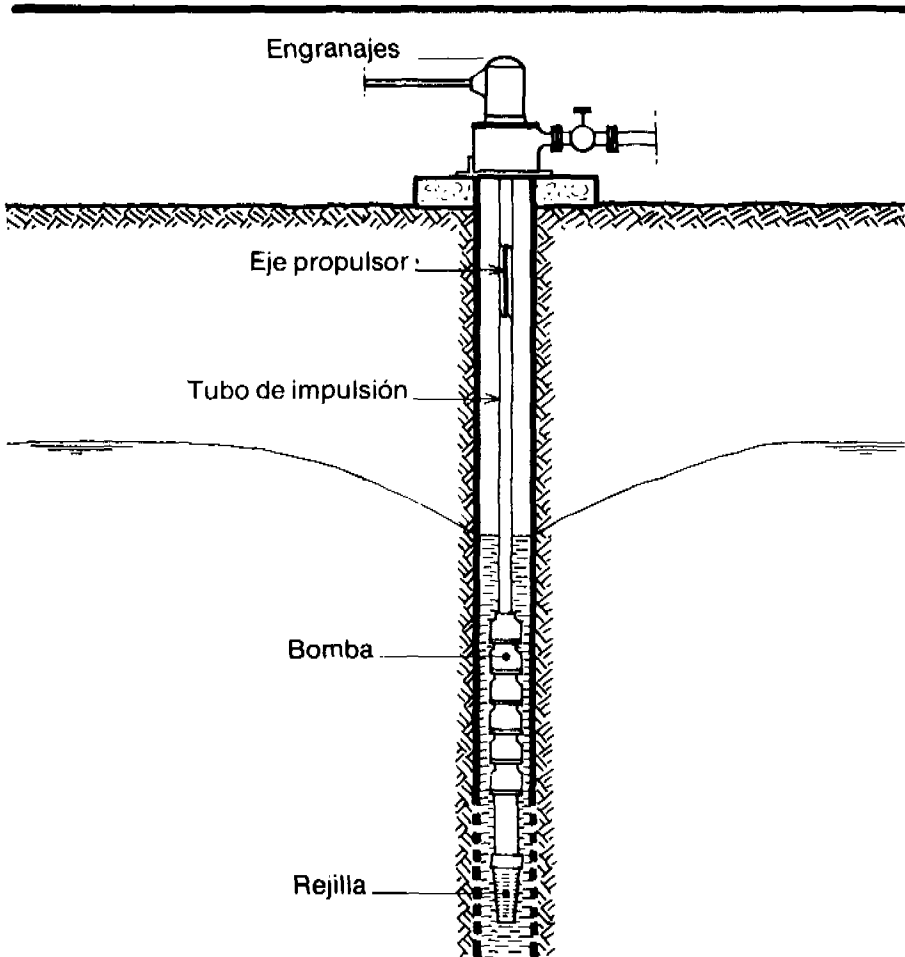


Figura 4.9: Bomba de turbina de pozo profundo.

Las bombas de turbina de pozo profundo son autocebantes y usualmente impulsadas por un motor eléctrico o un motor Diesel montado en la superficie usando un eje de impulsión largo. Este eje puede requerir soportes o estabilizadores especiales o espaciadores fijados a intervalos regulares. El alineamiento correcto del motor, el eje y la bomba es esencial para un rendimiento confiable y una vida útil larga. El caudal puede ser variado al ajustar la velocidad rotacional. La mayoría de estas bombas están diseñadas para altos caudales y generalmente, son más apropiadas para bombear grandes cantidades de agua para irrigación que para las cantidades relativamente pequeñas requeridas para el uso doméstico.

Bombas de flujo axial (o hélice)

Las bombas de flujo axial tienen una hélice con aletas radiales, las cuales rotan dentro de una carcasa recta. La hélice produce un flujo axial del agua. Se montan

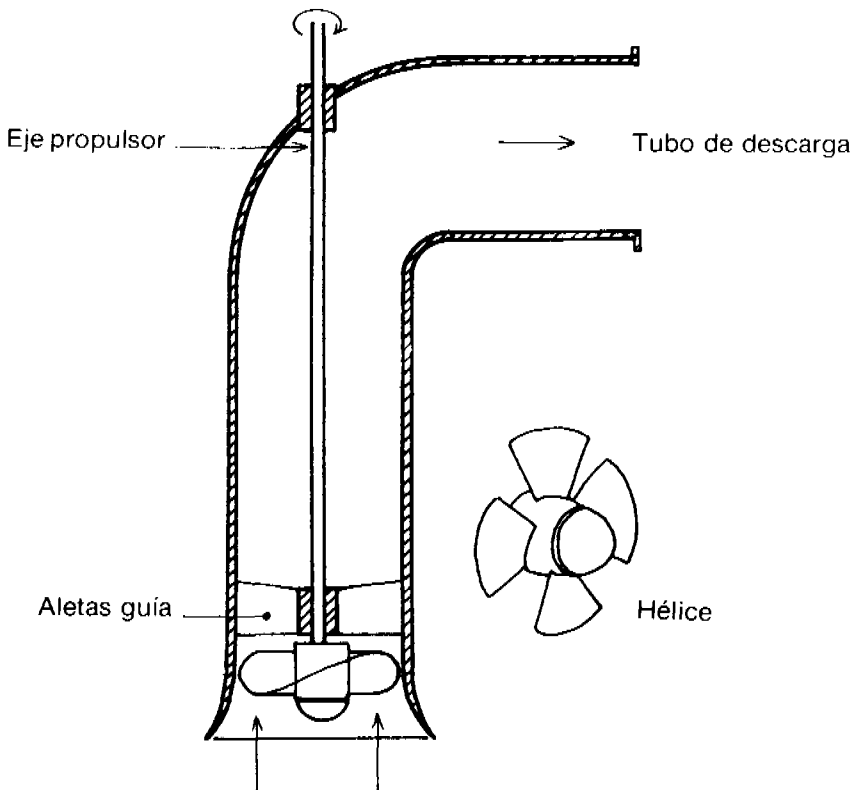


Figura 4.10: Partes principales de una bomba de flujo axial.

aspas fijas adentro de la camisa de la turbina para prevenir que el agua forme remolinos al bombearse (ver Figura 4.10). Como estas bombas son más indicadas para levantar agua a altos caudales contra bajas cabezas, son usadas principalmente para irrigación.

4.6 CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE VARIOS TIPOS DE BOMBAS

La Figura 4.11 da una indicación general de la aplicación más apropiada para varios tipos de bomba. Las bombas de pistón deben ser consideradas primordialmente para aplicaciones donde la cabeza de bombeo es alta y el caudal requerido es relativamente pequeño. Las bombas rotatorias helicoidales son principalmente aconsejables para cabezas de bombeo medianas y caudales limitados. Las bombas centrífugas pueden ser utilizadas, dependiendo de su diseño, para cabezas medianas o altas y una amplia gama de caudales. El uso de bombas centrífugas movidas por un eje está limitado a cierta profundidad,

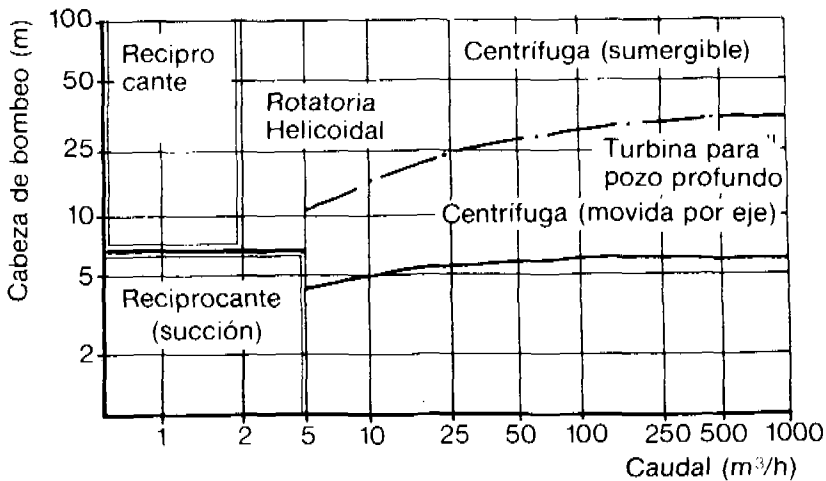


Figura 4.11: Indicación general de rangos de aplicación para varios tipos de bombas.

debido a la necesidad de asegurar un alineamiento y apoyo correcto del eje propulsor. Las bombas sumergibles son generalmente aplicadas a cabezas medianas y altas con tasas de flujos pequeñas a medianas. Las bombas de turbina de pozo profundo, debido a su gran capacidad de bombeo, generalmente están restringidas a aquellas pocas aplicaciones en suministro de agua en áreas rurales donde el caudal requerido es lo suficientemente grande para justificar este tipo de bomba. Las principales características, las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de bombas están dados en las tablas 4.1 y 4.2

Tabla 4.1: Características de diversos tipos de bombas.

Tipo de bomba	Rango práctico de profundidad (m)	Rango de caudal (l/min)	Fuente de potencia
Bombas de pistón reciprocante:			
Pozo no profundo	5-15	30- 50	Humana Viento
Pozo profundo	15-18	40-100	Humana Motor Viento
Bombas de cadena	2-12	5- 30	Humana Viento
Bombas de canastilla	5-40	10-100	Humana Animal Viento
Bombas de diafragma	5-30	20- 50	Humana Motor Viento
Bombas de flujo axial (hélice)	5-30	grande	Motor
Bombas centrifugas:			
Una etapa	15-50	variable	Motor solar
Multi-etapa movida por eje	20-40	variable	Motor viento
Multi-etapa sumergible	50-500	variable	Electro- generador solar
Bomba de turbina para pozo profundo	15-50	variable (100-20.000)	Motor

Tabla 4.2: Ventajas y desventajas de varios tipos de bombas.

Tipo de bomba	Ventajas	Desventajas
Bombas reciprocantes de pistón	<ul style="list-style-type: none"> - Baja velocidad de operación. - Construcción y diseño simple - Eficiencia poco afectada por variación en cabeza de bombeo. - Buena para cabezas de bombeo relativamente altas 	<ul style="list-style-type: none"> - Componentes bajo nivel de tierra (Sellos y válvulas) sujetos a fricción por rozamiento. - Se requiere mantenimiento regular y repuestos. - La descarga pulsa y está sujeto a vibración
Bombas de cadena	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño y construcción sencillos 	<ul style="list-style-type: none"> - Eficiencia baja - Indicada únicamente para cabezas de bombeo bajas
Bombas de canasta	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño y construcción sencillos 	<ul style="list-style-type: none"> - Eficiencia baja - Indicados únicamente para cabezas de bombeo bajas
Bombas rotatorias helicoidales	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad de operación puede ser variada en un amplio rango, requerimiento de bombeo. - Sólo una parte en movimiento en el pozo. - Descarga continua. 	<ul style="list-style-type: none"> - Indicadas únicamente para caudales pequeños. - Requiere engranajes - Sujeta a abrasión cuando la arena o limo están presentes en el agua bombeada. - No satisfactoria para pozos profundos.
Bombas de diafragma	<ul style="list-style-type: none"> - Poca fricción interna - Pocas partes en movimiento - Agua conteniendo partículas de tamaño menor que la apertura de las válvulas puede ser bombeada sin causar desgaste o daño a la bomba 	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad relativamente baja - No satisfactoria para pozos profundos - Diafragma expuesto a desgaste debido a flexiones continuas
Bombas de turbina de pozo profundo	<ul style="list-style-type: none"> - Amplia gama de capacidades y cabezas - Descargas continuas y puede tolerar pequeñas cantidades de arena o limo en el agua bombeada 	<ul style="list-style-type: none"> - La velocidad de operación debe ser relativamente constante para una eficiencia satisfactoria - Mantenimiento costoso y reparación que requiere técnicos entrenados y la remoción de la bomba del pozo
Bombas centrífugas	<ul style="list-style-type: none"> - Operación silenciosa - Amplia gama de capacidades - Descarga continua - satisfactoria únicamente cuando está trabajando cerca o en un punto de diseño de caudal de cabeza 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta velocidad de operación - Reparación y mantenimiento requieren de mucho conocimiento - Caudal y eficiencia son grandemente afectados por variaciones en la cabeza de bombeo

Tabla 4.2: Ventajas y desventajas de varios tipos de bombas. (Continuación)

Tipo de bomba	Ventajas	Desventajas
Movidas por eje	- Motor accesible a nivel de piso	- Alineamiento del eje crítico para operación efectiva y confiable
Sumergible	- Rectitud del pozo no es crítica	- Mantenimiento y reparación requieren que el motor y la bomba sean removidos del pozo
Bombas de flujo axial	- Indicado para bombeo de alto caudal contra cabezas limitadas	- Cara - No indicada para operación manual o acoplamiento a rotor de viento

BIBLIOGRAFIA

- ADDISON, H. (1958). *The pump users handbook*. London, UK, Pitman & Sons Ltd.
- AWWA (1984). *Design and construction of small water supply systems: a guide for managers*. Denver, Colorado, USA, American Water Works Association.
- BENAMOUR, A. (1979). *Les moyens d'exhaure en milieu rural*. Ougadougou, Burkina Faso, Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques.
- HOFKES, E. H. (1983). *Small community water supplies: technology of small water supply systems in developing countries (Technical Paper No. 18)* The Hague, The Netherlands, International Reference Centre for Community Water Supply and Sanitation, an Chichester, UK, Wiley & Sons.
- MCJUNKIN, F. E. (1977). *Hand pumps for use in drinking water supplies in developing countries (Technical paper No. 10)*. The Hague, The Netherlands, International Reference Centre for Community Water Supply and Sanitation.
- ROSS INSTITUTE (1974). *Small water supplies*. London, UK, London School of Hygiene and Tropical Medicine.
- WADDINGTON, D., and HERLEVICH, A. (1981). *Evaluation of pumps and motors for photovoltaic water pumping (Document SERI 3.12/TR-214-1423)*. Las Vegas, Nevada, USA, Solar Energy Research Institute.
- WOOD, A. D. (1976). *Water lifters and pumps for the developing world*. Tucson, Colorado, USA, Colorado State University.

5. Energía solar

El sol emite energía radiante a razón de 3.8×10^{20} MW, de la cual una proporción muy pequeña es interceptada por la Tierra. Sin embargo, una gran cantidad de radiación solar llega a la Tierra, equivalente a 1.2×10^{11} MW (WMO, 1981). Parte de la radiación solar es absorbida por la atmósfera y parte es reflejada nuevamente al espacio. La diferencia es transmitida a la superficie de la Tierra bien sea como radiación directa o difusa (ver Figura 5.1).

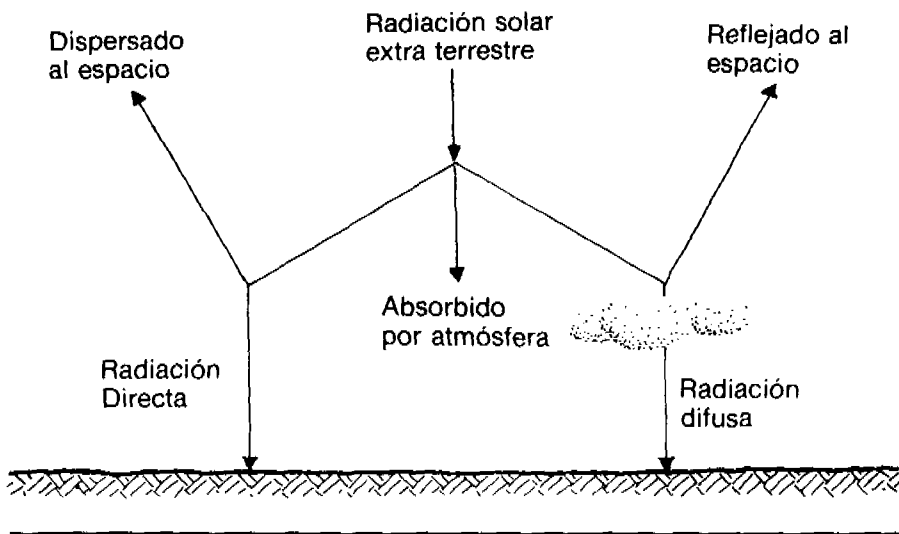


Figura 5.1: Los caminos para la radiación solar.

La cantidad total diaria de irradiación solar, directa y difusa, a nivel del piso es llamada la irradiación diaria global (o insolación) del sitio en cuestión, y es medida como energía ($\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}$, o $\text{kWh}/\text{m}^2\text{d}$). La tasa a la cual la irradiación solar llega al suelo se llama la irradiancia global, y es medida como potencia (W/m^2). La irradiancia global varía dependiendo de la hora del día, la estación, la localización (latitud) y nubosidad. En las zonas tropicales, puede llegar a un máximo de aproximadamente $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ a mediodía de un día claro, pero cuando el día está muy cubierto por nubes puede llegar a ser sólo $100 \text{ W}/\text{m}^2$. La irradiación global diaria promedia en un plano horizontal varía de $7 \text{ MJ}/\text{m}^2\text{d}$

($2\text{kWh/m}^2\text{d}$) en la mayor parte de Europa del Norte, hasta $22\text{MJ/m}^2\text{d}$ ($6\text{kWh/m}^2\text{d}$) en algunas regiones tropicales áridas (ver Figura 5.2).

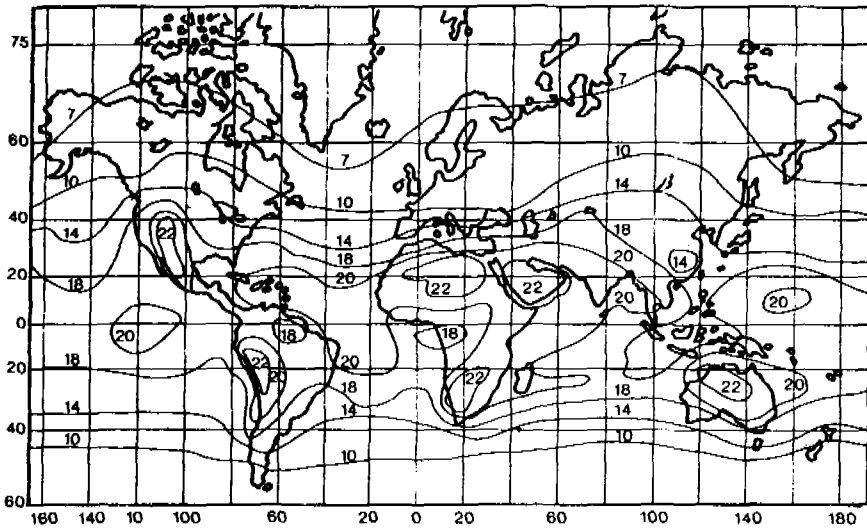


Figura 5.2: Irradiación diaria global promedio (MJ/m^2 día) sobre el plano horizontal (WMO, 1981).

Para determinar si un sitio es apropiado para bombas solares, se requiere un registro diario de irradiación que cubra por lo menos uno, y preferiblemente dos años. El diseño de un sistema de bombeo solar no puede estar basado en una irradiación promedio diaria, porque entonces se bombearía insuficiente agua en meses de irradiación por debajo del promedio. Por consiguiente, usualmente se selecciona el mes de la menor irradiación como la base para dimensionar las instalaciones de bombeo solar, y se deben hacer provisiones para períodos de nubosidad en las cuales la irradiación puede ser mucho menor que la promedio. Las variaciones locales para una localidad tropical árida y otra húmeda están dadas en la Figura 5.3.

La irradiación global sobre un arreglo o colector solar inclinado hacia el ecuador es mayor que sobre el plano horizontal. La irradiación sobre una superficie inclinada es la base para el diseño de un sistema solar de bombeo. Esta puede ser calculada usando tablas de conversión para datos de irradiación sobre el plano horizontal. La inclinación óptima de un arreglo o colector solar es aproximadamente igual a la latitud de la localidad; por ejemplo, se puede utilizar un ángulo de 25° para un lugar cuya latitud sea de 25°C . Teóricamente, esta inclinación permitiría que la máxima cantidad de irradiación global incida sobre el arreglo o colector. En la práctica, el ángulo seleccionado es muchas veces un poco mayor ($5-15^\circ$) para poder colectar la mayor cantidad posible de la irradiación menor de las épocas más frías.

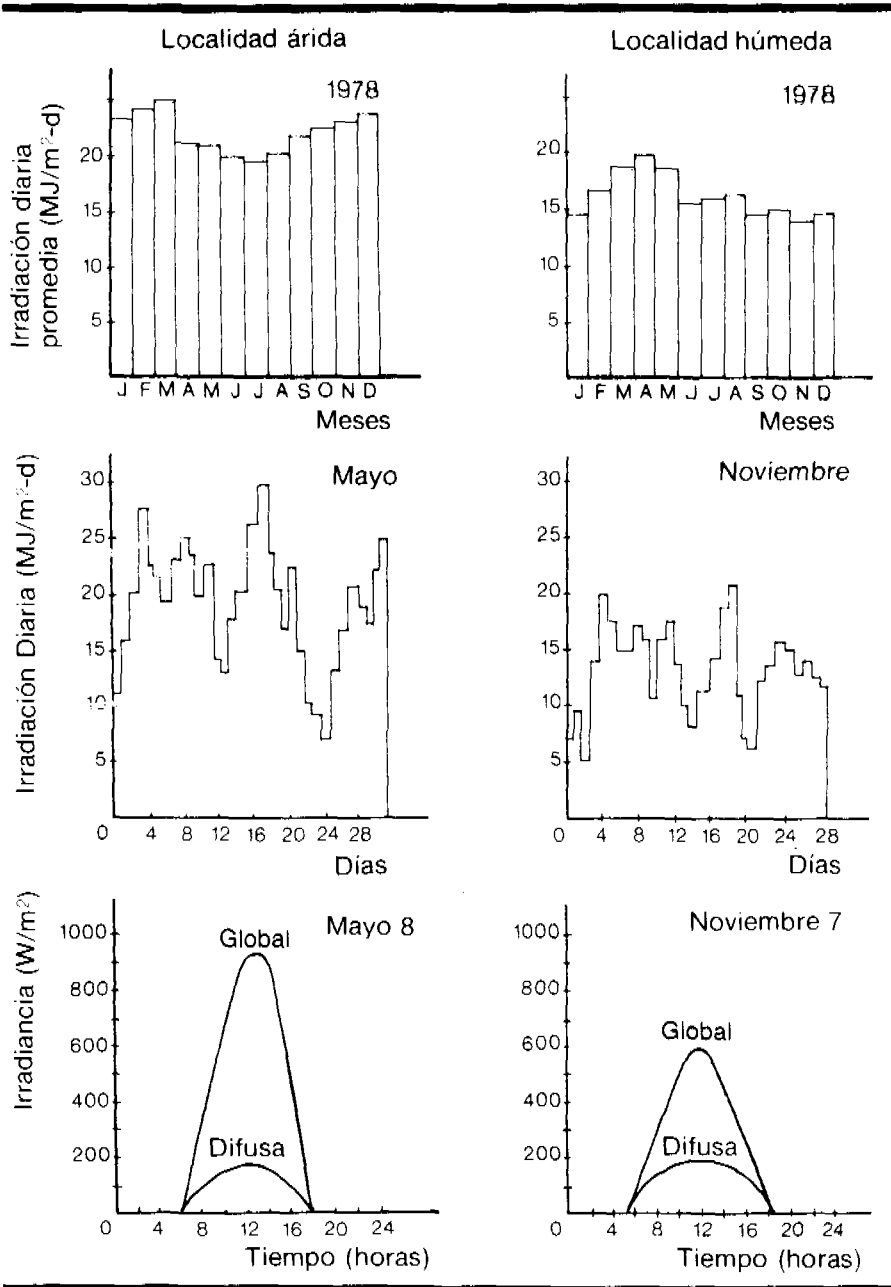


Figura 5.3: Variación anual, mensual y diaria de la irradiación solar para una localidad árida y otra húmeda en el trópico (Halcrow & Partners y IT Power, 1982).

5.1 SISTEMAS SOLARES DE BOMBEO

En los sistemas solares de bombeo, la irradiación solar es convertida a energía mecánica útil para el bombeo del agua. Esto puede ser hecho de dos maneras, usando tecnologías fundamentalmente diferentes:

- Celdas fotovoltaicas que producen electricidad, la cual es posteriormente utilizada para producir potencia mecánica;
- Conversión termodinámica del calor solar en potencia mecánica.

Los sistemas de bombeo fotovoltaico utilizan celdas fotovoltaicas, las cuales convierten la irradiancia directamente a electricidad, la cual a su vez es utilizada para mover un motor eléctrico para impulsar la bomba (ver Figura 5.4). Se ha probado técnicamente diversos sistemas de bombeo de este tipo y se pueden obtener de un cierto número de fabricantes. Se estima que, en el presente, han sido instalados aproximadamente 2000 en diversos sitios en todo el mundo.

Un análisis tanto de costos de capital como costos recurrentes indica que las bombas fotovoltaicas, a pesar de su alto costo de capital, probablemente pueden ser económicamente viables para áreas de altos niveles de irradiación solar, y que seguramente serán más atractivas en la medida que la producción mayor de celdas fotovoltaicas resulte en costos reducidos.

En los sistemas de bombeo solares termodinámicos, la irradiación es usada para producir calor en un colector solar, y este calor es convertido mediante una máquina térmica en potencia mecánica para mover la bomba. Las bombas solares termodinámicas fueron demostradas por primera vez hacia finales del siglo XIX, y desde entonces, un número de bombas prototipo han sido diseñadas, construidas, instaladas y operadas. Sin embargo, varios problemas técnicos no han permitido que ellas trabajen confiablemente y en forma continua, y más aún, los costos de operación son altos. A pesar de todos los esfuerzos para desarrollar bombas solares termodinámicas, no existen por el momento sistemas comerciales probados en el campo.

5.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE BOMBEO

Componentes, configuración y principio de operación

Los principales componentes de un sistema fotovoltaico de bombeo son:

- Arreglo fotovoltaico para convertir la irradiación solar en electricidad de corriente directa;
- Subsistema motor-bomba para convertir la electricidad en potencia mecánica para el bombeo de agua.
- Equipo de control;
- Sistema de almacenamiento y distribución del agua.

Existen varias configuraciones para sistemas de bombeo fotovoltaicos, dependiendo de la fuente de agua y el tipo de bomba utilizada (ver Figura 5.4). Una posibilidad interesante para bombear agua desde una fuente superficial consiste en montar los módulos y la bomba en una plataforma flotante.

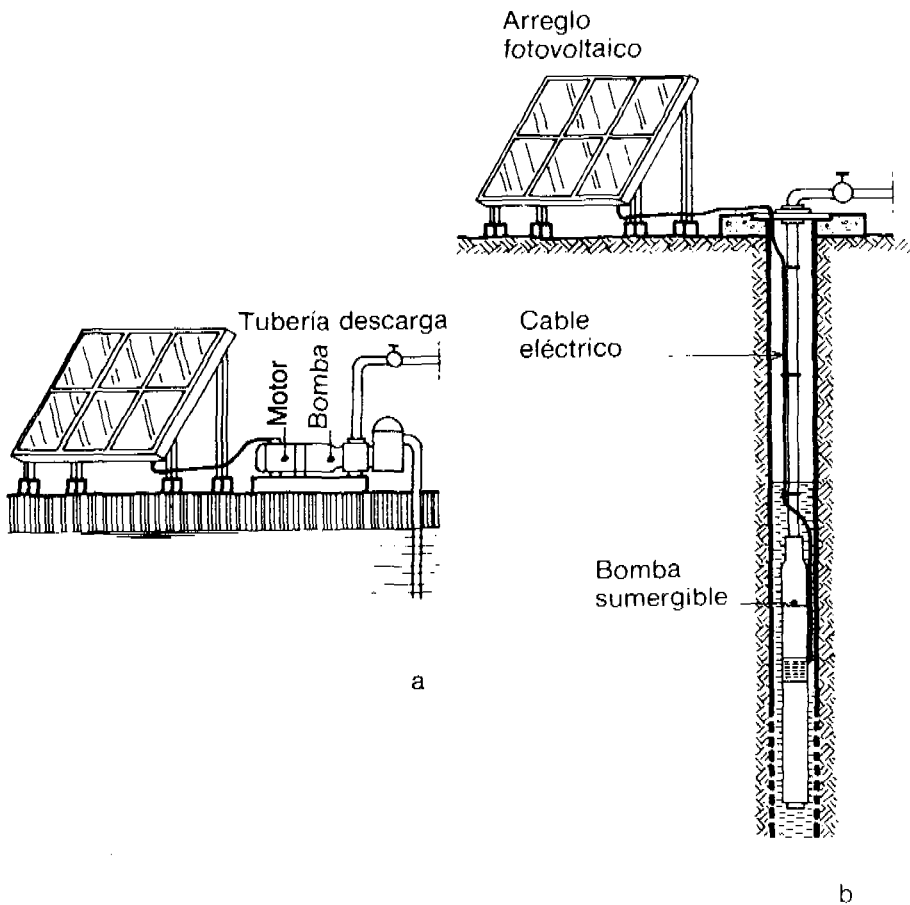


Figura 5.4: Configuraciones para sistemas fotovoltaicos de bombeo: (a) motor y bomba de succión montados en la superficie (Kenna, 1985); (b) conjunto sumergible bomba/motor.

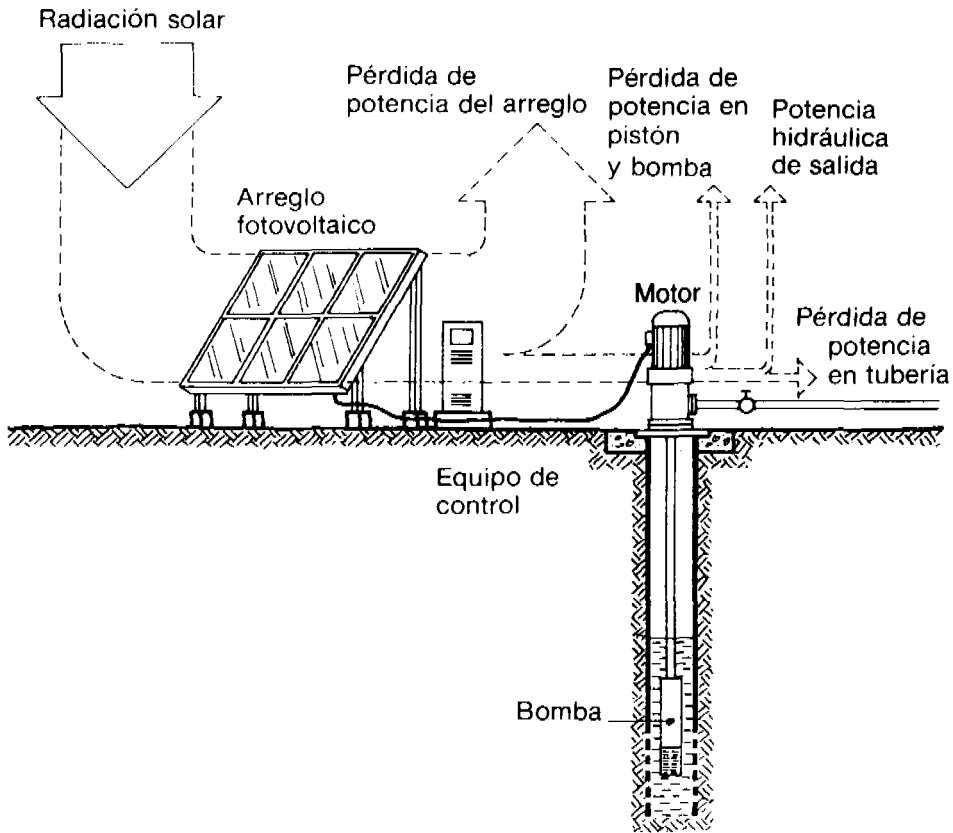


Figura 5.5: Conversión de potencia en un sistema fotovoltaico de bombeo.

El caudal y la cabeza de bombeo determinan la carga sobre el motor eléctrico, para el cual el arreglo debe proveer la potencia requerida en la forma de un voltaje y una corriente eléctrica. La conversión de potencia en un sistema fotovoltaico de bombeo y las pérdidas de potencia asociadas están dadas en la Figura 5.5.

La relación general entre la irradiancia solar, la potencia del arreglo, y la potencia hidráulica de salida está mostrada en la Figura 5.6. La potencia eléctrica suministrada por el arreglo varía con la irradiancia recibida, y la eficiencia del motor es afectada por el voltaje y corriente producidos por el arreglo, lo cual a su vez es reflejado en el patrón de caudal del agua.

Un sistema fotovoltaico de bombeo comienza a bombear agua cuando la irradiancia solar pasa por encima del umbral de entrada del sistema el cual puede

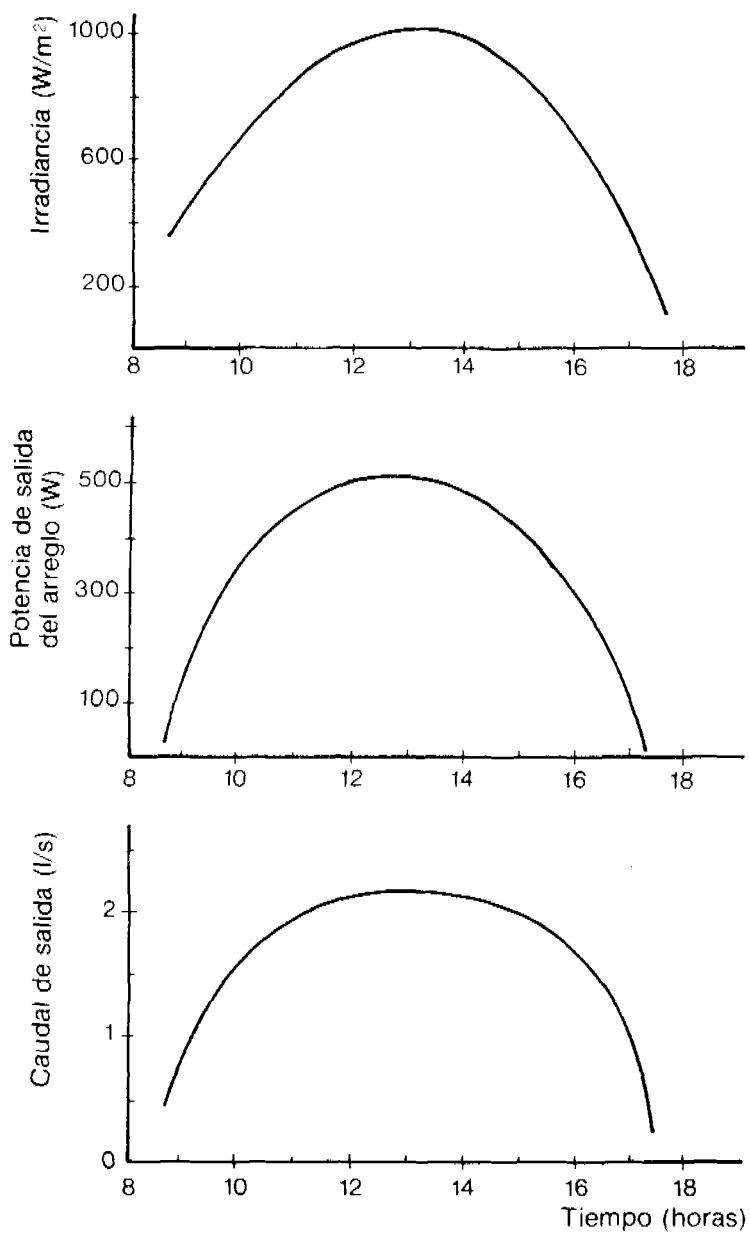


Figura 5.6: Relación entre irradiancia, potencia de salida del arreglo, y caudal de bombeo para una bomba solar fotovoltaica (Halcrow & Partners y IT Power, 1981).

ser, por ejemplo, $300\text{W}/\text{m}^2$. El caudal entonces aumenta en la medida que la irradiación también aumenta. En la medida que el subsistema motor-bomba llega a su punto óptimo de operación, la eficiencia aumenta en forma tal que el caudal aumenta más rápidamente que la irradiación. En la tarde, cuando el arreglo se calienta, la eficiencia del arreglo fotovoltaico es reducida, y de esta forma la potencia eléctrica producida también se reduce. Aún más tarde, cuando el arreglo comienza a enfriarse, la eficiencia fotovoltaica vuelve a aumentar, pero para ese momento la irradiación está decreciendo. Cuando la irradiación solar cae debajo del umbral, se genera una potencia eléctrica insuficiente para que el sistema pueda bombear agua.

5.3 CELDAS FOTOVOLTAICAS, MODULOS Y ARREGLOS

Las primeras celdas fotovoltaicas fueron instaladas por los Laboratorios Bell en 1955 en un sistema de telefonía rural en Georgia, EEUU. En 1958, se utilizaron celdas solares para suministrar potencia a un satélite de telecomunicación y desde entonces, se han hecho grandes avances en la tecnología y producción de celdas fotovoltaicas. El tipo más común de celda fotovoltaica es la celda de silicio monocristalino, pero las celdas de silicio policristalino se están popularizando más cada día. El silicio es una forma altamente purificada de uno de los elementos más abundantes en la arena común. Para hacer celdas fotovoltaicas, se fabrican grandes cristales de silicio ultra puro. Estos son cortados en tabletas muy delgadas, las cuales posteriormente son "dopadas" con otros aditivos. También existen varios tipos de celdas fotovoltaicas hechas de materiales diferentes al silicio, pero éstas aún no se consiguen comercialmente, o su desempeño es tan poco confiable que en términos de uso real aún se encuentran en la etapa de desarrollo.

Cuando la radiación solar incide sobre la superficie de una celda fotovoltaica, se genera un potencial eléctrico. Contactos metálicos, pegados a una grilla en la parte anterior y posterior de la celda, permiten el flujo de una corriente eléctrica. La configuración general de una celda fotovoltaica de silicio se muestra en la Figura 5.7.

Varias celdas fotovoltaicas son conectadas eléctricamente para formar un módulo. Mientras más celdas estén conectadas en serie, mayor el voltaje que suministra; mientras más celdas estén en paralelo, más alta la corriente. Las celdas usualmente están laminadas en un panel rectangular entre un vidrio transparente y un respaldo rígido. Anteriormente, se usaba vidrio común templado para la superficie transparente, pero la experiencia del campo ha demostrado que el vidrio es demasiado vulnerable a ser quebrado. Se han probado plásticos de policarbonato y resinas polimerizadas, pero se encontró que se deterioraban bajo la humedad, el polvo y la luz ultravioleta. Actualmente se prefieren capas laminadas de vidrio y plásticos de alta resistencia al impacto para la cara transparente.

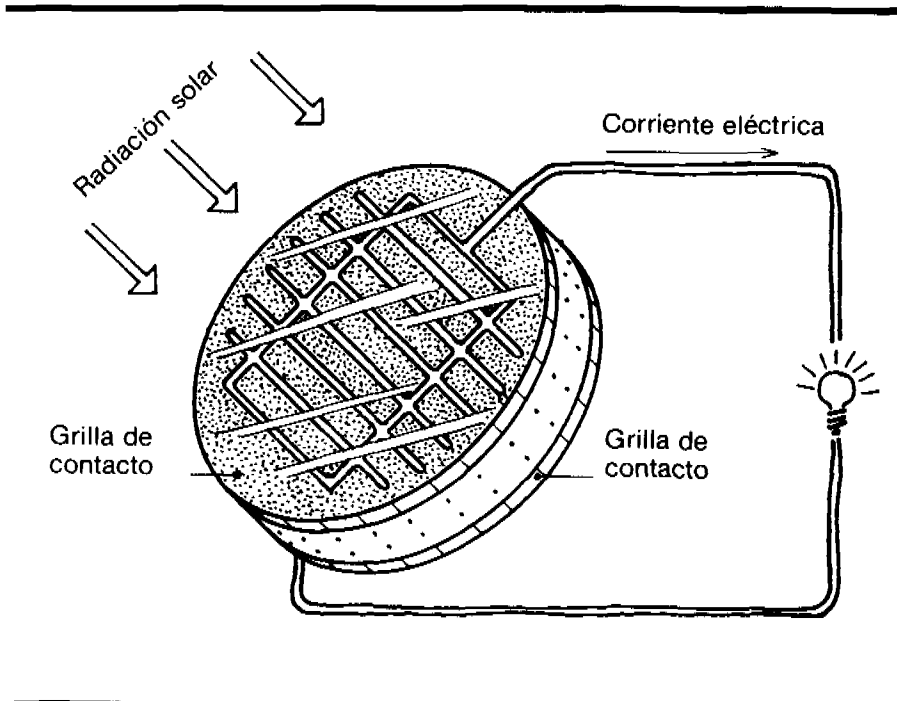


Figura 5.7: Configuración de una celda fotovoltaica de silicio (Halcrow & Partners y IT Power, 1982).

El factor de empaquetamiento para celdas redondas, esto es la razón del área de las celdas al área de superficie del módulo es aproximadamente 75%. Los módulos compuestos de celdas cuadradas ya están en el mercado, y estos tienen un factor de empaquetamiento de casi el 100%.

La capacidad de potencia que suministra un módulo fotovoltaico está dada en Watios pico (Wp). Este es el valor de la máxima potencia del módulo, cuando opera bajo una irradiancia de 1000 W/m^2 a una temperatura de referencia de la celda de 25°C . Las temperaturas de la celda bajo condiciones de operación muchas veces son mayores, entre 50 y 70°C . Se puede obtener una corrección aproximada reduciendo la potencia suministrada por el arreglo en un 0.5% por cada grado Centígrado por encima de la temperatura de referencia de 25°C . Por ejemplo, a una temperatura de celda de 57°C la potencia de salida debe ser aproximadamente 16% menor.

Arreglos fotovoltaicos

Un arreglo fotovoltaico consiste de un número de módulos montados sobre un marco de acero galvanizado o perfiles extruidos de aluminio (Figura 5.8). Los

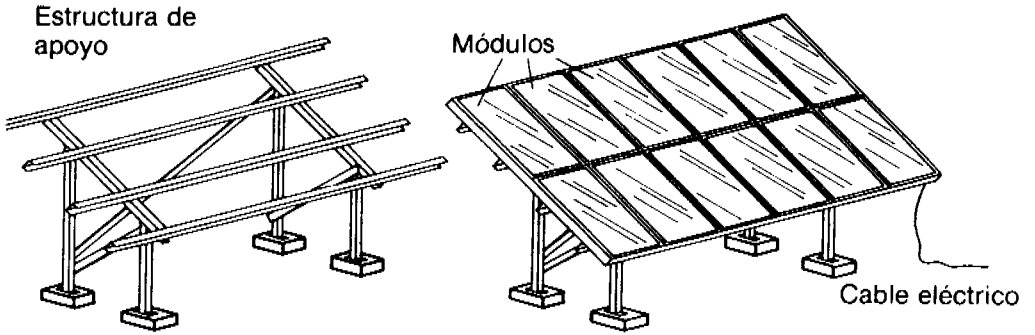


Figura 5.8: Estructura de montaje para un arreglo fotovoltaico.

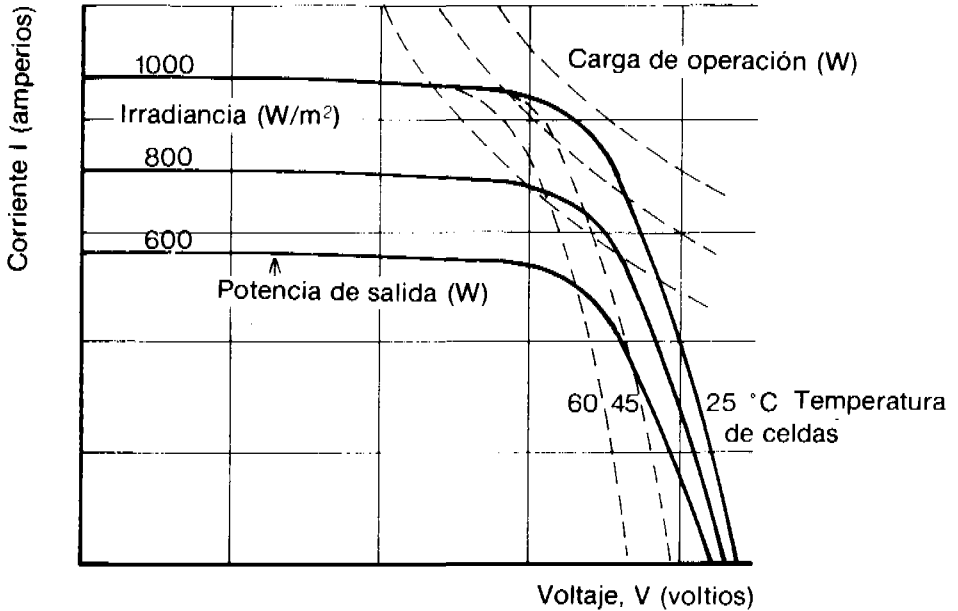


Figura 5.9: Curvas de corriente/voltaje para un arreglo fotovoltaico (Grundfos, 1985).

módulos que forman el arreglo son interconectados electricamente de forma tal que la corriente y el voltaje producido por todos los módulos se suman para dar la corriente total del arreglo y el voltaje de salida. Se pueden hacer gráficas de corriente contra voltaje para varios niveles de irradiación y temperatura del arreglo (Figura 5.9).

El punto de operación del arreglo depende de la combinación de corriente y voltaje requeridos para operar el subsistema motor-bomba. Si el conjunto motor-bomba es desconectado, el arreglo opera bajo condiciones de circuito abierto y produce únicamente voltaje, y no corriente. Si es puesto en cortocircuito, sólo hay corriente, mas no voltaje. Bajo estas condiciones, la potencia suministrada al sistema es cero. La potencia máxima es suministrada para el arreglo cuando opera en el punto de quiebre de la curva corriente-voltaje, para el nivel de irradiación y la temperatura de arreglo particular del caso (ver Figura 5.9). La máxima potencia de salida es aproximadamente 0.7 veces el producto de corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto.

Si el motor eléctrico está acoplado directamente al arreglo, el sistema operará en el punto donde la curva corriente-voltaje del motor intercepta con la curva corriente-voltaje del arreglo para el nivel de irradiancia prevalente y la temperatura de operación. Como este no es el punto de operación de máxima potencia, se pueden utilizar condicionadores de potencia electrónicos para controlar las condiciones de operación y mantener las potencias de salida lo más cercano posible al valor máximo. Los primeros sistemas de bombeo fotovoltaico usaban únicamente equipo de control muy básico, pero los requerimientos cada vez mayores para optimizar la eficiencia han promovido el desarrollo de equipo electrónico para condicionamiento bastante sofisticado.

La potencia de salida de un arreglo puede ser reducida en un 5-10% cuando la superficie del arreglo se vuelve menos transparente, como resultado del envejecimiento o de la acumulación de suciedad.

5.4 SUBSISTEMA MOTOR-BOMBA

Es importante cotejar las características de operación del motor con aquellas de la bomba, seleccionando un acople apropiado y su correspondiente transmisión de potencia. La incorporación de un volante puede tener ventajas, cuando se utiliza una bomba reciproca de pistón. Actualmente los sistemas fotovoltaicos de bombeo de agua utilizan los siguientes tipos de motor eléctrico:

- Motores de corriente directa con imán permanente y escobillas;
- Motores de corriente directa sin escobillas;
- Motores de corriente alterna.

Los motores con escobilla requieren reemplazo de las escobillas a intervalos regulares. Para escobillas convencionales, estos intervalos son de 2.000-4.000 horas, lo cual equivale a uno o dos años de uso en un sistema de bombeo solar. Se

han desarrollado escobillas especiales resistentes al desgaste, las cuales pueden durar hasta 10.000 horas de operación.

También hay motores de corriente directa sin escobillas, con un rotor de imán permanente y devanados que son electrónicamente conmutados. Estos motores sin escobillas, diseñados para el uso como bombas solares, son un desarrollo relativamente nuevo y todavía pueden tener unos problemas electrónicos. Sin embargo, el potencial de los motores de corriente directa sin escobillas en sistemas de bombeo de agua está aumentando en la medida que su confiabilidad mejora.

Los motores de corriente directa generalmente son atractivos para sistemas fotovoltaicos de bombeo porque el arreglo suministra una corriente directa, de forma tal que el motor pueda acoplarse directamente. Sin embargo, el rango de motores de corriente alterna que se consigue es mucho mayor, porque ellos son de fabricación estándar y sus precios son generalmente más bajos que los motores de corriente directa. La utilización de un motor más barato en un sistema de bombeo solar puede ser una economía falsa, si se requiere un arreglo mayor y por consiguiente más caro para compensar su menor eficiencia.

El trabajo de desarrollo en motores eléctricos por parte de un número de fabricantes, pretende reducir los costos de mantenimiento, aumentar la durabilidad de los rodamientos, y aumentar la vida de servicio de las escobillas si éstas se usan. Un desarrollo particularmente importante es la producción de motores sin escobillas de alta confiabilidad.

Si se utiliza un motor de corriente alterna en un sistema de bombeo solar, se requiere un inversor para convertir la corriente directa del arreglo a corriente alterna. Esto involucra algunos costos adicionales y algunas pérdidas de energía. Por esta razón no se han considerado los motores de corriente alterna seriamente hasta el momento, puesto que este costo adicional aumentaría el costo global del sistema de bombeo considerablemente, especialmente para aplicaciones en pequeña escala. Adicionalmente, los motores de corriente alterna son menos eficientes y tienen un requerimiento mucho más alto de corriente de arranque que los motores de corriente directa. Sin embargo, se están desarrollando nuevos tipos de motores de corriente alterna, los cuales tienen una mayor eficiencia y éstos podrían volverse atractivos para sistemas de bombeo solar. La tendencia actual es usar, o bien motores sin escobilla, o bien motores de corriente alterna diseñados especialmente con un inversor eficiente y confiable.

Bombas

La escogencia de una bomba para un sistema de bombeo fotovoltaico depende de la capacidad de bombeo requerida, la cabeza de bombeo, si va a ser movido por un motor sumergible acoplado directamente o por medio de un eje y un motor montado en la superficie, así como de otros factores. La selección de bombas se discutió en el capítulo 4.

5.5 EQUIPO ADICIONAL

Mecanismos de seguimiento

La mayoría de los arreglos son montados en posición fija por simplicidad y para reducir los costos. Sin embargo, a veces se utilizan arreglos móviles, los cuales pueden ser orientados para seguir el movimiento aparente del sol. Esto aumenta considerablemente la complejidad de la instalación, pero tiene la ventaja de un incremento sustancial, aproximadamente un 30%, en la potencia suministrada por el arreglo durante el día. Alternativamente, si el arreglo es móvil, el área requerida puede ser reducida en aproximadamente 20% para una potencia hidráulica dada.

Los mecanismos de seguimiento operados manualmente pueden ser económicamente viables, si es posible contar con un operador para que ajuste la orientación del arreglo durante el día. Por ahora, los mecanismos de seguimiento automáticos son caros y complejos. Generalmente, los costos son mayores de los que se pueden justificar por el aumento en la potencia de salida o la reducción del área del arreglo, y la mayor complejidad de la instalación del arreglo con su mecanismo de seguimiento es una desventaja marcada.

Mecanismos concentradores

Al aumentar la intensidad de la radiación incidente sobre las celdas se aumenta su potencia de salida. Por consiguiente, el área de las celdas podría ser reducido concentrando la radiación solar con aparatos especiales, tales como espejos concentradores o lentes Fresnel moldeados en un soporte de plástico. Las celdas solares también pueden ser rodeadas por superficies reflectivas que formen un reflector parabólico.

Mientras que los aparatos de concentración pueden reducir el área de celdas requeridas para una potencia dada, tienen un número de desventajas. Las celdas serían calentadas a temperaturas altas, y por consiguiente requerirían de enfriamiento. Para factores de concentración solar bajos, las aletas enfriadas por aire pueden ser adecuadas, pero para mayores factores de concentración, se requiere enfriamiento por agua. Si el sistema de enfriamiento falla, es muy probable que se dañen las celdas. Adicionalmente, la mayoría de tipos de concentradores solares necesitan seguimiento para mantenerlos enfocados eficientemente hacia el sol, y cualquier sistema de seguimiento hace que el sistema de bombeo solar sea considerablemente más complejo. En la mayoría de los casos, es cuestionable si los concentradores son justificables económicamente. Sin embargo, puede ser económicamente viable poner pequeños reflectores en la periferia de un arreglo plano, porque esto aumentaría la potencia de salida lo suficientemente para justificar el pequeño costo adicional.

Baterías

En algunos sistemas de bombeo fotovoltaico, se incorporan baterías para el almacenamiento de la energía. La ventaja de usar baterías es que se puede proveer un suministro continuo de electricidad a partir del suministro variable del arreglo fotovoltaico.

Las baterías también pueden acumular energía eléctrica para uso durante períodos en los cuales se requiera más energía que aquella que es producida por el arreglo. Sin embargo, las desventajas de usar baterías son considerables:

- Son muy caras;
 - Se requiere adicionarles agua periódicamente, a menos que se usen baterías selladas especiales, pero estas son extremadamente caras;
- Las pérdidas de energía debidas al ciclo de carga-descarga de las baterías reducen la eficiencia global del sistema de bombeo;
- Las baterías tienen una vida relativamente corta, por ejemplo, las baterías convencionales de plomo y ácido pueden durar sólo 5 años bajo las condiciones de campo.

Es posible usar una capacidad de almacenamiento en baterías sobredimensionada, o baterías de mejor calidad pero esto es muy costoso. Los sistemas solares de bombeo sin baterías son favorecidos por sus ventajas en costo, simplicidad, y mayor confiabilidad.

5.6 EFICIENCIAS DE CONVERSION

El subsistema motor-bomba de una bomba fotovoltaica solar opera bajo condiciones diferentes que aquellas con suministro de voltaje constante para los cuales están diseñados los motores eléctricos convencionales, porque la potencia producida a partir de la irradiación solar existente varía considerablemente. Por consiguiente, el subsistema de una bomba fotovoltaica debe poder operar eficientemente sobre un amplio rango de combinaciones de voltaje y corriente. Se pueden distinguir dos tipos de eficiencia:

- La eficiencia de conversión de potencia: Esto es, la razón de potencia hidráulica entregada por la bomba a la potencia eléctrica suministrada, el cual será más alto cuando el subsistema opere en o cerca del punto de diseño.
- La eficiencia de conversión de energía diaria: esto es, La razón entre la energía hidráulica entregada por la bomba a la energía eléctrica suministrada por el arreglo durante todo el día; es el promedio de las eficiencias variables de potencia logradas durante el día.

La eficiencia diaria de conversión de energía es el parámetro más importante, porque determina el tamaño del arreglo requerido para un caudal en particular, y el arreglo es el rubro de mayor costo, por un amplio margen, para un sistema fotovoltaico de bombeo. En un sistema bien diseñado, se debería obtener una eficiencia de conversión de energía diaria del 4.5% con la tecnología presente, pero en la práctica, 2.0 - 3.5% es lo más usual.

5.7 ACOPLAMIENTO DEL CONJUNTO BOMBA-MOTOR A LAS CARACTERÍSTICAS DE POTENCIA DE SALIDA DEL ARREGLO.

Para comenzar a operar, el subsistema bomba-motor requiere una cierta potencia para sobreponerse al torque de arranque. La irradiancia requerida para producir el torque de arranque es el nivel de umbral para el sistema de bombeo solar. Si se usan bombas reciprocantes de pistón, la irradiancia de umbral es relativamente alta, por la alta resistencia al arranque de este tipo de bomba. Por consiguiente, si se usa una bomba de pistón en un sistema de bombeo fotovoltaico, se requiere un nivel relativamente alto de irradiación o el almacenamiento en una batería de la energía eléctrica para poder arrancar la bomba. Las características de las bombas centrífugas movidas por motor de corriente directa están bien acopladas a las características de salida de potencia de un arreglo fotovoltaico. Estos arreglos bomba-motor, pueden por consiguiente, ser acoplados directamente al arreglo. Una bomba centrífuga tiene un torque de arranque relativamente alto, y comenzará a rotar lentamente aun si la irradiancia es limitada, pero no habrá bombeo de agua hasta que la irradiancia haya aumentado al nivel en el cual se produce suficiente potencia para desarrollar la velocidad rotacional requerida para el bombeo.

Si la irradiancia de umbral para un sistema de bombeo fotovoltaico es alta, se puede considerar la incorporación de un equipo condicionador de potencia, conocido como el seguidor del punto de máxima potencia. Este es un aparato electrónico que controla la salida de potencia hacia el motor, de forma tal que la potencia producida a niveles bajos de irradiancia puede ser maximizada para obtener la potencia de umbral requerida para arrancar la bomba. Como resultado, las bombas fotovoltaicas equipadas con este aditamento pueden comenzar más temprano y parar más tarde, dando un mayor suministro de agua de esta forma. El uso de equipo de acondicionamiento de potencia implica costos adicionales y una pérdida de potencia, y es una fuente adicional de posibles fallas.

Una alternativa, que es un método más simple de acoplar las características del motor-bomba y la salida de potencia del arreglo, consiste en controlar el voltaje producido por el arreglo fotovoltaico en un valor fijo. El arreglo entonces trabajará relativamente cerca a su punto de máxima eficiencia para la mayoría, pero no para todos los niveles de irradiancia, y consecuentemente la operación del sistema de bombeo será relativamente óptima.

Los inversores son equipos electrónicos que convierten la corriente directa suministrada por el arreglo a corriente alterna de monofase o de trifásica, para mover los conjuntos bomba-motor que tienen un motor de corriente alterna. Para maximizar su beneficio, se pueden incorporar controles electrónicos para proveer el acoplamiento de impedancias. Entonces el inversor aumentará el voltaje y la frecuencia de la corriente alterna automáticamente y de esta forma permitirá que el sistema de bombeo entregue agua con niveles bajos de irradiancia. Se dice que las eficiencias pico de algunos inversores que se consiguen

comercialmente son del orden del 85%, pero la mayoría de inversores son muy ineficientes bajo carga parcial. Por consiguiente, sólo deben ser usados los inversores diseñados especialmente para sistemas de bombeo solar.

Las baterías también suministran el acoplamiento de impedancia, porque permiten que el motor eléctrico arranque a bajos niveles de irradiación, pero tienen varias desventajas como fue explicado en la Sección 5.5.

5.8 REQUERIMIENTOS DE ALMACENAMIENTO DE AGUA

Los sistemas de bombeo solar requieren un tanque de capacidad suficiente, usualmente el suministro de 2 a 3 días, para asegurar el suministro continuo de agua. Se requiere un tanque elevado de almacenamiento para suministrar suficiente cabeza para la distribución del agua por tubería.

La capacidad de almacenamiento requerida para garantizar el suministro de agua a un nivel deseado de certeza puede ser calculada de los datos de irradiación de la localidad. Por ejemplo, el almacenamiento de un suministro para dos días puede dar una certeza del 80% de que haya agua, mientras que el almacenamiento de un suministro de 3 días puede dar una certeza del 90%.

5.9 DIMENSIONAMIENTO APROXIMADO DE SISTEMAS DE BOMBEO FOTOVOLTAICO

El arreglo fotovoltaico debe ser tan pequeño como sea posible para el requerimiento de potencia, para poder diseñar el sistema más económicamente viable. El costo del arreglo es aproximadamente proporcional a la capacidad pico instalada y representa una considerable proporción del costo fijo total del sistema de bombeo.

La irradiación promedio diaria en el mes menos asoleado del año, y el requerimiento máximo de agua, determina el tamaño del arreglo requerido. Para un dimensionamiento relativamente correcto, todos los fabricantes de bombas solares fotovoltaicas tienen modelos de computador disponibles para determinar el tamaño mínimo del arreglo. Sin embargo, se puede utilizar un procedimiento simplificado para obtener el tamaño aproximado del arreglo:

- 1) La demanda de energía hidráulica del sistema de bombeo puede ser estimada como:

$$E_{hvd} = \frac{Q \cdot H}{100}$$

Donde: E_{hvd} = Demanda de energía hidráulica (MJ/d)

Q = Caudal de bombeo (m³/d)

H = Cabeza de bombeo (m)

Por ejemplo, un sistema con una capacidad de 10 m^3 que opere contra una cabeza de 20 m, tiene una demanda de energía hidráulica estimada de 2 MJ/d.

- 2) Se estima igualmente la eficiencia promedio diaria del sistema de bombeo. Para sistemas de bombeo que operen contra cabezas bajas de 2 a 5 mts, una eficiencia del 30% puede ser una buena aproximación; para sistemas que operan contra cabezas en el rango de 10 a 30 mts, se puede asumir una eficiencia del 40%.
- 3) La demanda de energía hidráulica se divide por la eficiencia diaria de energía del subsistema, para dar el requerimiento diario de energía a ser suministrada por el arreglo. En el ejemplo: $2 \text{ MJ/d} : 0.4 = 5 \text{ MJ/d}$.
- 4) Una consulta a la Figura 5.2 indica la irradiación promedio diaria para el área en cuestión; por ejemplo, en el área alrededor de Dakar, Senegal, es aproximadamente 20 MJ/m^2 .
- 5) Para estimar la irradiación promedio diaria disponible en el mes de menos insolación, el valor encontrado en 4 se reduce en el 20%. En el ejemplo: $20 \times 80\% = 16 \text{ MJ/m}^2\text{d}$. Si se dispone de cifras para irradiación solar promedio mensual de estaciones meteorológicas, es más correcto usar la irradiación promedio diaria del mes de mínima insolación de estos registros.
- 6) El requerimiento diario de energía suministrada como se calculó en (3) se divide por la irradiancia promedio diaria del mes de diseño, tal como se encontró en (5), y el resultado se multiplica por 1200 para obtener el tamaño aproximado en Watios pico para el arreglo. En el ejemplo, $(5/16) \times 1200 = 375 \text{ Wp}$.
- 7) Los arreglos solares están disponibles en módulos de potencia nominal máxima entre 35 y 45 Wp. Por consiguiente, el resultado encontrado en (6) debe ser dividido por el tamaño aproximado del módulo, según el caso. El resultado se redondea al próximo entero para dar el número de módulos requeridos. En el ejemplo: $375/35 = 11$ ó $375/40 = 10$.

Este procedimiento simplificado de dimensionamiento también puede ser hecho gráficamente, utilizando la Figura 5.10.

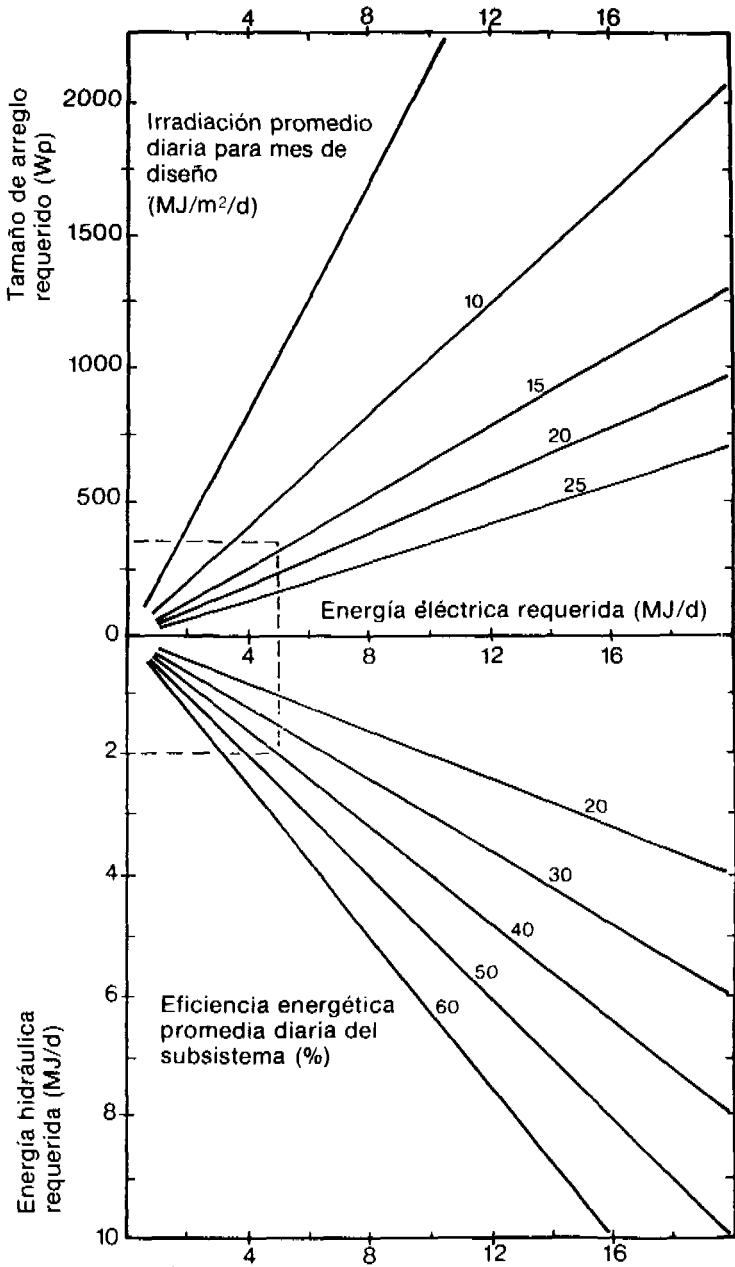


Figura 5.10: Curvas para dimensionamiento aproximado de un sistema de bombeo fotovoltaico (Halcrow & Partners y IT Power, 1983).

5.10 SISTEMAS TERMODINAMICOS DE BOMBEO

Por ahora, los sistemas de bombeo solares termodinámicos no han sido probados en el campo, pero para ser completo este trabajo, se da una descripción de estos sistemas. La configuración básica y sus componentes son (ver Figura 5.11):

- Colector solar que convierte la irradiación solar en calor;
- Una máquina térmica que usa un ciclo termodinámico para convertir calor a energía mecánica;
- Bomba;
- Sistema de almacenamiento y distribución.

Alrededor de 60 bombas solares termodinámicas producidas en Francia han sido instaladas en los países en desarrollo. La eficiencia de conversión de estas bombas bajo condiciones de campo era de 1%, pero dada su complejidad, pocas han operado por algún tiempo considerable.

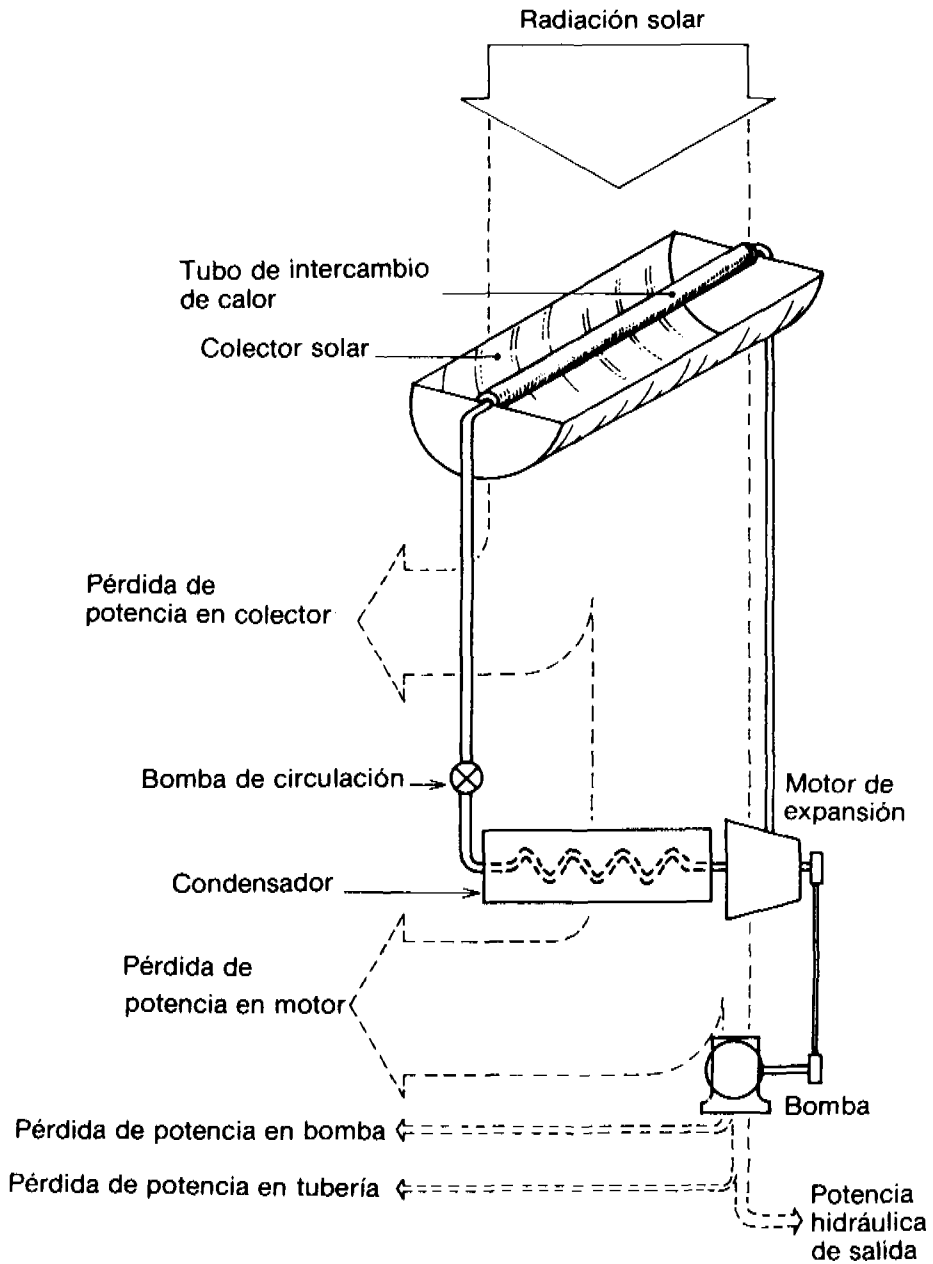


Figura 5.11: Configuración básica de un sistema termodinámico solar de bombeo (Halcrow & Partners y IT Power, 1981).

BIBLIOGRAFIA

- BAHADORI, M. N. (1978). Solar water pumping. *Solar Energy*, 4, 21, 307-311.
- ESCAP (1980). Renewable sources of energy. Vol. 1: Solar energy. Bangkok, Thailand, United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific.
- FRAENKEL, P. L. (1979). The power guide: a catalogue of small-scale power equipment. London, UK, Intermediate Technology Development Group.
- GRUNDFOS (1985). Solar pumping systems. Bjerringbro, Denmark, Grundfos A/S.
- HALCROW & PARTNERS and IT POWER (1981). Small-scale solar-powered pumping systems: A, phase 1 project report; B, technical and economic review (UNDP/World Bank project GLO/80/003). Washington DC, USA, World Bank.
- HALCROW & PARTNERS and IT POWER (1982). Testing and demonstration of small-scale solar powered pumping systems: state-of-art report. Washington, DC, USA, World Bank.
- HALCROW & PARTNERS and IT POWER (1983). Small-scale solar-powered pumping systems: the technology, its economics and advancement. (Main report UNDP/World Bank project GLO/80/003). Washington, DC, USA, World Bank.
- KENNA, J. P., and GILLETT, W. B. (1985). Solar water pumping: a handbook. London, UK, Intermediate Technology Publications Ltd.
- LANGERHORST, J. et al. (1977). Solar energy. Report of a study on the application of solar energy in developing countries. The Hague, The Netherlands, Netherlands Ministry for Development Cooperation.
- TATKLA A. (1978). Development of solar energy utilization in developing countries. Technology for solar energy utilization (Development and Transfer of Technology Series No. 5). New York, USA, (United Nations/Vienna), United Nations Industrial Development Organization, 7-38.
- CATALOGUE OF MANUFACTURERS and LITERATURE ON SOLAR PHOTOVOLTAIC WATER PUMPS UNICEF (1982). New York, USA, UNICEF.
- WMO (1981). Meteorological aspects of solar radiation as an energy source (Technical Note No. 172). Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization.

6. Energía eólica

Los vientos que cubren la Tierra son una gran fuente de energía, cuya potencia total estimada es de 2700 millones de MW (WMO, 1978). Sin embargo, sólo una pequeña proporción está sobre las áreas de tierra y lo suficientemente cercana a la superficie para ser capturada por rotores de viento. Aun así, la producción potencial de energía útil es muy grande, estimándose en el rango de 2 a 10 millones de MW (Park, 1981). Por ahora, la energía eólica suministra sólo 0.04% del total de energía consumida, pero para el año 2000 este valor puede haber aumentado hasta el 2%, y quizás aún más (UNESCO, 1981). Un estudio del Banco Mundial ha identificado 20 países en desarrollo para los cuales más del 40% de su territorio tiene una velocidad promedio anual de vientos mayor a 3.5 m/s (Blake, 1978). A este nivel de velocidad de viento, los sistemas de bombeo de energía eólica o bombas eólicas pueden ser muy efectivos en costo. La distribución mundial de potencia eólica a 10 m sobre el nivel de tierra está mostrada en la Figura 6.1.

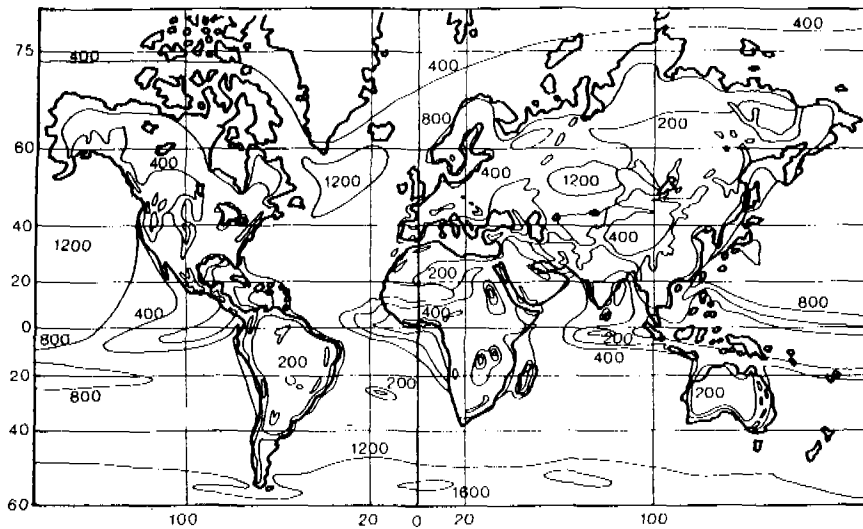


Figura 6.1: Distribución mundial de potencia eólica (flujo promedio de potencia del viento para un área unitaria perpendicular a la dirección del viento, medido 10 m sobre el nivel del terreno, W/m^2). Valores estimados para extensiones grandes relativamente libres de obstrucciones (WMO, 1978).

Ya en el siglo IV, se usaban las bombas eólicas extensivamente en el Medio Oriente, y su aplicación se expandió por todo el Asia Central y del Este, hasta llegar a la China. Desde el siglo VI, las bombas eólicas empezaron a usarse cada vez más en Europa, y ya para el siglo XIX fueron usadas en gran escala para el bombeo de agua, particularmente en los Países Bajos, Dinamarca y el Norte de Alemania. Las bombas eólicas también tuvieron un papel importante en el desarrollo de Norte América y Australia, donde aún se usan en grandes números. Esto también es el caso en Argentina, la URSS y Sur Africa, donde las bombas eólicas son usadas primordialmente para el abrevadero del ganado. Aproximadamente un millón de bombas eólicas están siendo usadas hoy en el mundo. En años recientes, se ha renovado el interés en desarrollar bombas eólicas confiables y de bajo costo para los países en desarrollo, tanto para suministro de agua doméstica, como para propósitos de riego.

6.1 SISTEMAS EOLICOS DE BOMBEO DE AGUA

Se requiere un rotor relativamente grande para capturar suficiente viento y producir energía útil. En las bombas eólicas acopladas mecánicamente, el rotor se acopla directamente a la bomba. Usualmente se utiliza una biela para una bomba de pistón recíprocante, mientras que para las bombas rotativas, el acoplamiento más común es por medio de engranajes o polcas. Generalmente, una bomba rotatoria dará una carga de operación más favorable sobre el rotor de viento que una bomba de pistón, porque la potencia requerida para operar la bomba de pistón cambia continuamente a lo largo del ciclo de bombeo. En contraposición, una bomba rotatoria impone una carga relativamente constante y continua sobre el rotor.

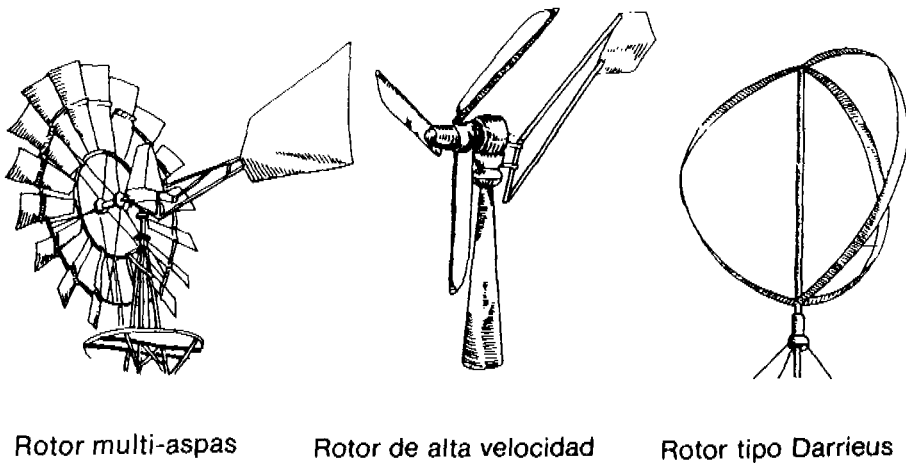
Las bombas eólicas acopladas eléctricamente, usan un cable eléctrico para la transmisión de potencia desde el generador eléctrico eólico a un motor eléctrico que mueve la bomba. Este tipo de sistema de bombeo eólico, a veces se llama "bombeo eólico-eléctrico" o "bombeo remoto". La transmisión de potencia por medio del cable eléctrico permite que el rotor sea situado a alguna distancia del pozo en un sitio favorable, tal como la cima de una loma, para capturar más viento y producir más potencia de la que sería posible en el sitio del pozo, el cual muchas veces está situado en un valle o una depresión.

Se utiliza un rotor de 2 ó 3 aspas para mover el generador mediante un sistema de engranajes que aumenta su velocidad para obtener la velocidad de rotación requerida. Los polos del generador son conectados al cable de potencia mediante un conjunto de anillos deslizantes. Si el generador produce corriente alterna trifásica, esta potencia puede ser suministrada directamente a un conjunto motor-bomba sumergible estándar con un motor de inducción trifásico. La potencia máxima del motor eléctrico no debe ser mayor que aproximadamente 40% de la potencia máxima del generador.

6.2 ROTORES EOLICOS

Los rotores eólicos de eje horizontal están equipados con dos o más aspas. Los rotores multiaspas están diseñados para velocidades de rotación relativamente bajas, entre 30 y 80 revoluciones por minuto, y producen un torque relativamente alto, haciéndolos apropiados para mover bombas acopladas mecánicamente. Los rotores de altas revoluciones que tienen dos o tres aspas, son más apropiados para mover un generador eléctrico a velocidades rotacionales altas, para bombas movidas eléctricamente. Un rotor lento, multi-aspas, debe ser de una construcción fuerte, debido a la carga considerable y al torque ejercido por el rotor (Figura 6.2). Para un rotor de altas revoluciones, el alineamiento y el diseño del perfil de las aspas son críticos debido a las fuerzas aerodinámicas mayores ejercidas sobre las aspas del rotor ("fricción del rotor"), las fuerzas centrífugas considerables, y el mayor riesgo de vibraciones.

Hay dos tipos principales de rotores eólicos de eje vertical, los de "sustentación" y los de "arrastre". El arrastre es la fuerza del viento sobre un rotor, en dirección opuesta y paralela al flujo de aire. La sustentación es la fuerza sobre el rotor, hacia arriba y perpendicular al viento. El rotor Darrieus que consiste de un número de aspas curvadas de forma aerodinámica, es un ejemplo del rotor del tipo sustentación. Este tipo de rotor puede producir igual cantidad de potencia como los de eje horizontal, pero no arranca solo. Un ejemplo del rotor tipo arrastre es el rotor Savonius, el cual tiene aspas en forma de S. Este tipo de rotor tiene una potencia de salida limitada y es difícil protegerlo contra vientos fuertes.



Rotor multi-aspas

Rotor de alta velocidad

Rotor tipo Darrieus

Figura 6.2: Tipos de rotores usados en bombas eólicas.

6.3 TORRES

La torre debe ser lo suficientemente fuerte para resistir las grandes fuerzas ejercidas sobre ella por el rotor en movimiento, especialmente con vientos altos. Como estas torres normalmente tienen de 6 a 15 metros de altura, necesitan tener una construcción fuerte. Una falla o el alineamiento incorrecto de la torre puede dañar completamente la bomba eólica.

6.4 SISTEMAS DE TRANSMISION

En un sistema de bombeo eólico que utiliza una bomba de pistón, la potencia usualmente se transmite por un eje de levas, el cual hace subir y bajar la varilla para mover la bomba (Figura 6.3).

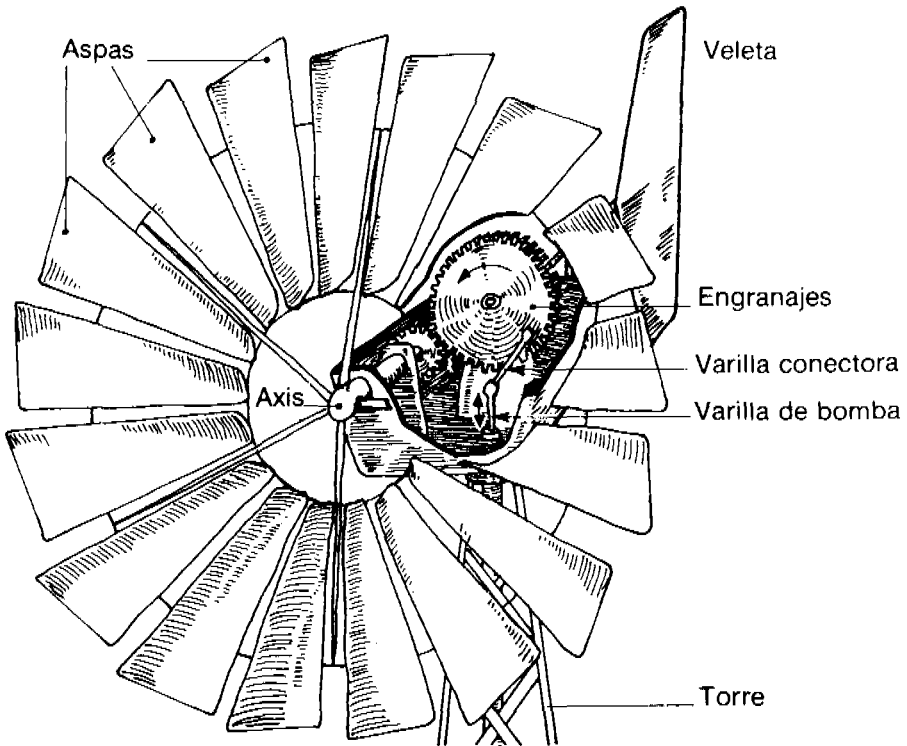


Figura 6.3: Mecanismo de transmisión para una bomba eólica que usa bomba de pistón.

Otro tipo de sistema de transmisión para éstas es un elemento basculante que hace reciprocar la varilla directamente. El arco barrido por el elemento basculante controla la longitud de la carrera de la bomba.

En algunos sistemas de transmisión que se consiguen comercialmente, se utiliza un juego de engranajes y un sistema de rodillo encamisado para producir el movimiento reciprocante de la varilla de la bomba. Se puede incorporar un mecanismo de embrague para permitir la rotación libre del rotor hasta que tenga suficiente velocidad y potencia para arrancar la bomba al engranarse el embrague.

Si el mecanismo de transmisión incorpora un mecanismo para cambiar la longitud de la carrera, el torque requerido para arrancar la bomba puede ser ajustado para vientos débiles y fuertes. Este mecanismo es similar a los piñones de transmisión utilizados en bicicletas, y permite que la bomba arranque a velocidades más bajas del viento, aumentando de esta forma la cantidad de agua bombeada.

Una forma más sencilla de reducir el torque de arranque de una bomba eólica de pistón es haciendo un pequeño orificio en el pistón. De esta forma, la resistencia de arranque es menor, y la bomba puede comenzar a operar a velocidades de viento más bajas. En vientos más fuertes, el orificio causará una pequeña pérdida de agua, pero esta usualmente no es importante, y está más que compensada por el caudal mayor obtenido a bajas velocidades del viento.

Las bombas rotatorias pueden ser acopladas al rotor mediante piñones, o poleas. Los rotores de viento y las bombas centrífugas tienen características similares de torque y velocidad, pues ambos varían con la velocidad de rotación al cuadrado. De esta forma, la carga sobre el sistema de mecanismos es favorable. Con rotores de eje vertical, se puede acoplar el rotor a la bomba por un sistema sencillo de bandas. Se pueden adaptar poleas de diferente diámetro para ajustar la velocidad rotacional de la bomba, y de esta forma la operación de la bomba puede ser ajustada al régimen de velocidad del viento para diferentes estaciones.

6.5 MECANISMOS DE CONTROL

Toda bomba eólica debe tener un mecanismo de control para protegerla de rotar demasiado rápido y ser dañada en vientos altos. Las bombas eólicas modernas están equipadas con mecanismos de control de diversos tipos, todos los cuales limitan la velocidad rotacional del rotor, o lo paran en períodos de vientos excesivos. En algunos diseños, se incorpora un mecanismo de freno, el cual funciona automáticamente si la velocidad del rotor excede un máximo preestablecido, o si ocurre un desbalance de las aspas. También es posible usar un mecanismo de "salida", mediante el cual el rotor es sacado automáticamente del viento por una veleta cuando la velocidad del viento aumenta más del máximo permisible para el rotor. Bajo condiciones normales de operación, la veleta está perpendicular a la dirección del viento, pero en vientos altos la fuerza sobre ella

hace que el rotor se salga de la dirección del viento. Otro mecanismo de control comprende un elemento que modifica el flujo del aire sobre el rotor cuando la velocidad del viento aumenta más allá del nivel máximo permitido. La presión aerodinámica ejercida por el flujo de aire perturbado es mucho menor que aquella del viento sin perturbación, y de esta forma la velocidad del rotor será reducida para permanecer dentro de los límites seguros.

6.6 TEORIA BASICA DEL BOMBEO EOLICO

Cuando el viento fluye con una velocidad (V) a través de un área (A), esto representa un flujo másico, el cual puede ser calculado (Figura 6.4):

$$m = \rho_a \cdot A \cdot V$$

Donde:

- m = flujo másico del aire (kg/s)
- ρ_a = densidad del aire (kg/m³)
- A = área barrida por el rotor (m²)
- V = velocidad del viento (m/s)

La potencia cinética del viento puede ser calculada:

$$P_{cin} = 1/2 \rho_a \cdot A \cdot V^3$$

Donde:

- P_{cin} = potencia cinética (W)
- ρ_a = densidad del aire (kg/m³)
- A = área barrida por el rotor (m²)
- V = velocidad del viento (m/s)

Esta ecuación indica dos puntos importantes:

- La potencia eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento. De esta forma varía grandemente. Por ejemplo, a una velocidad del viento de 3 m/s, la potencia es 16 W/m² de área barrida por el rotor; a 6 m/s, es aproximadamente 130 W; a 10 m/s aproximadamente 600 W.
- La potencia eólica es proporcional al área barrida por el rotor, y por consiguiente es proporcional al diámetro del rotor al cuadrado.

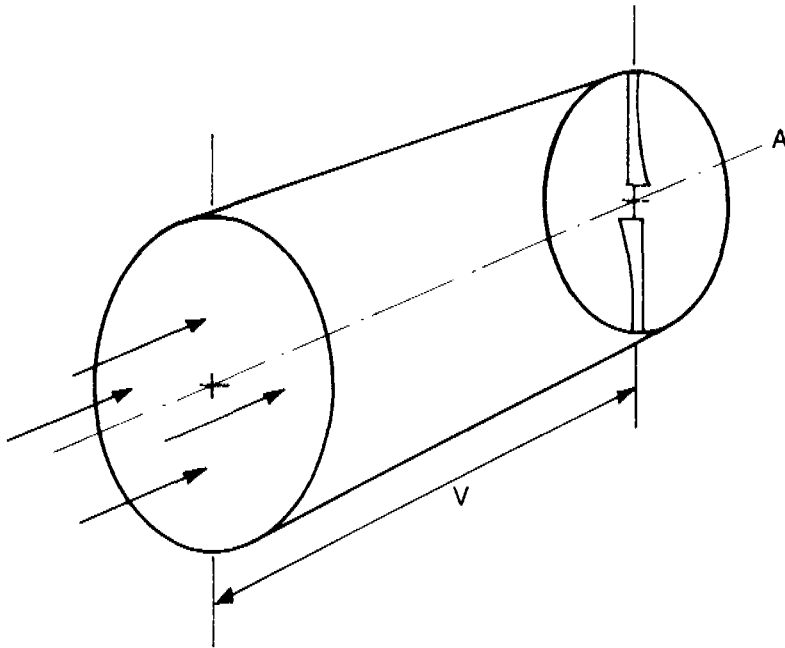


Figura 6.4: Flujo másico de aire.

Por razones físicas, la potencia que un rotor puede extraer del viento es sólo una parte de la energía cinética del viento. Esta proporción se conoce como el coeficiente de potencia, C_p . Su valor máximo teórico es aproximadamente del 60%, pero el valor práctico del C_p de los rotores está en el rango del 10 al 40%.

La potencia hidráulica de salida de una bomba eólica está determinada por la velocidad del viento, el área barrida por el rotor, el C_p del rotor, la eficiencia en la transmisión de potencia, y la eficiencia con la cual la bomba usa la potencia mecánica suministrada para producir una salida hidráulica. Esto se expresa en la siguiente ecuación:

$$P = 1/2 \rho_a \cdot C_p \cdot q \cdot A \cdot V^3$$

Donde:

- P = potencia hidráulica de salida (W)
- C_p = coeficiente de potencia (%)
- q = eficiencia de conversión de potencia (decimal)
- ρ_a = densidad del aire (kg/m^3)
- A = Área barrida por el rotor (m^2)
- V = velocidad del viento (m/s)

El C_p del rotor depende de su diseño aerodinámico y de su velocidad, y no es constante, sino que varía con la velocidad del viento. El rotor debe ser seleccionado o diseñado de forma tal que el coeficiente de potencia sea máximo para la velocidad del viento que prevalece en el sitio donde se va a usar. Esto se llama la velocidad de viento de diseño, y no es lo mismo que la velocidad promedio del viento. Una bomba eólica de baja velocidad de diseño no requiere mucho viento para arrancar, y tendrá una potencia de salida relativamente alta para vientos no muy fuertes. Sin embargo, para mayores velocidades del viento, su eficiencia de conversión de potencia será menor, y la potencia total de salida para las velocidades de viento que prevalecen será relativamente pequeña, porque la mayor potencia de los vientos fuertes no es usada eficientemente.

La conversión de potencia y las pérdidas de potencia en una instalación de bombas eólicas están dadas en la Figura 6.5. Las pérdidas de potencia ocurren en el rotor, en el generador eléctrico (si es usado), en el mecanismo de transmisión, y en la bomba en sí. La Tabla 6.1 da valores indicativos de estas pérdidas de potencia.

6.7 RECOLECCION DE DATOS Y REGIMEN DE VIENTOS

Como los regímenes de viento varían considerablemente de un lugar a otro, los datos de estudios globales o regionales deben ser utilizados únicamente para dar una indicación. Idealmente, el potencial eólico de cada sitio debe ser valorado basado en registros de velocidad del viento para un período largo, pero éstos no se consiguen frecuentemente. Usualmente, se deberán tomar mediciones de velocidad del viento en el sitio donde se va a instalar la bomba eólica. Se requieren registros horarios de velocidad del viento para un período de por lo menos un año, y preferiblemente para año y medio. Estudios hechos en Norte América han demostrado que la velocidad promedio del viento determinada sobre esta base está dentro del 10% del promedio de largo plazo con un nivel de confianza del 90%.

El equipo para medir velocidad de viento más universalmente usado es el anemómetro. Es esencial que cada anemómetro, y el método usado para leer y registrar los datos, sea revisado para asegurar cuál unidad de medida (m/s, nudos, millas/hora) ha sido utilizado en el registro.

De los datos recolectados, es necesario analizar el régimen de vientos, para valorar la viabilidad de instalar un sistema de bombeo eólico en un sitio en particular. Esto puede hacerse basado en una distribución de tiempo, como por ejemplo, la velocidad promedio para cada hora individual del día. La distribución de frecuencias da la frecuencia de la ocurrencia de velocidades de viento en cada intervalo específico, como por ejemplo, el número de horas durante las cuales la velocidad del viento está entre 3 y 4 m/s.

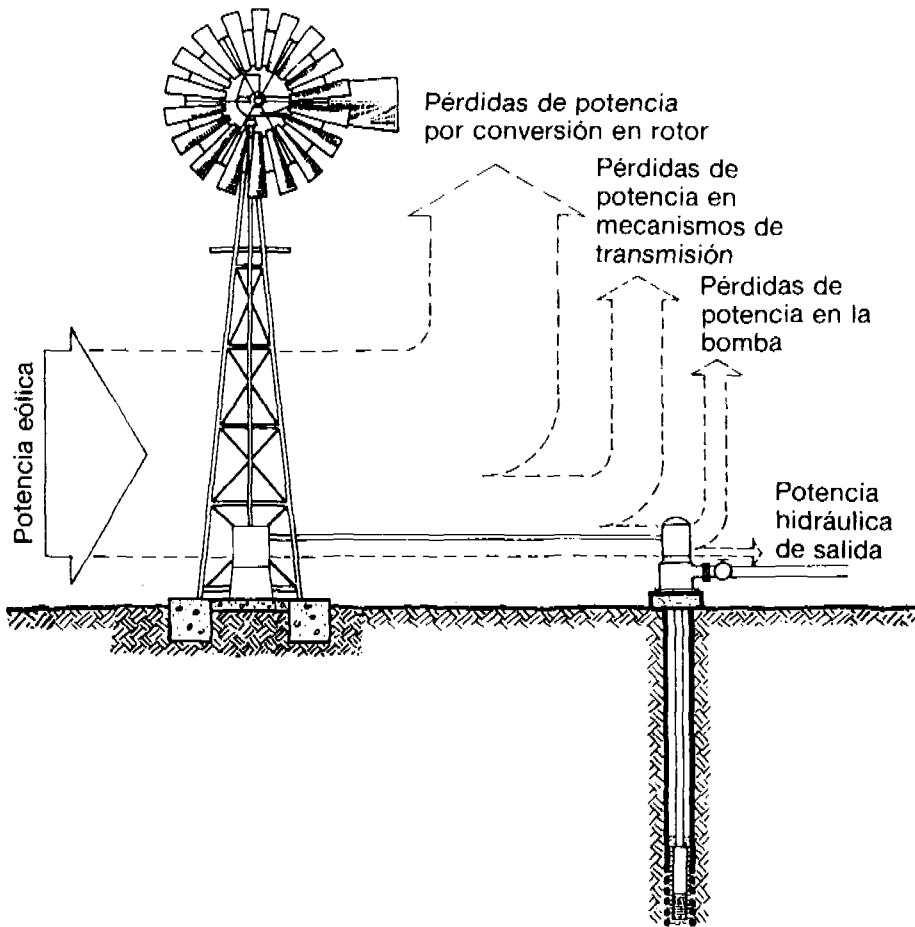


Figura 6.5: Conversión de potencia en una instalación de bombeo eólico.

Tabla 6.1: Indicación de pérdidas de potencia en sistemas de bombeo eólico

Componente	Rango de pérdida de potencia (%)
Generador eléctrico	10-20
Cable eléctrico	5-10
Motor eléctrico	20-30
Bomba centrífuga	30-50
Bomba de pistón	40-50

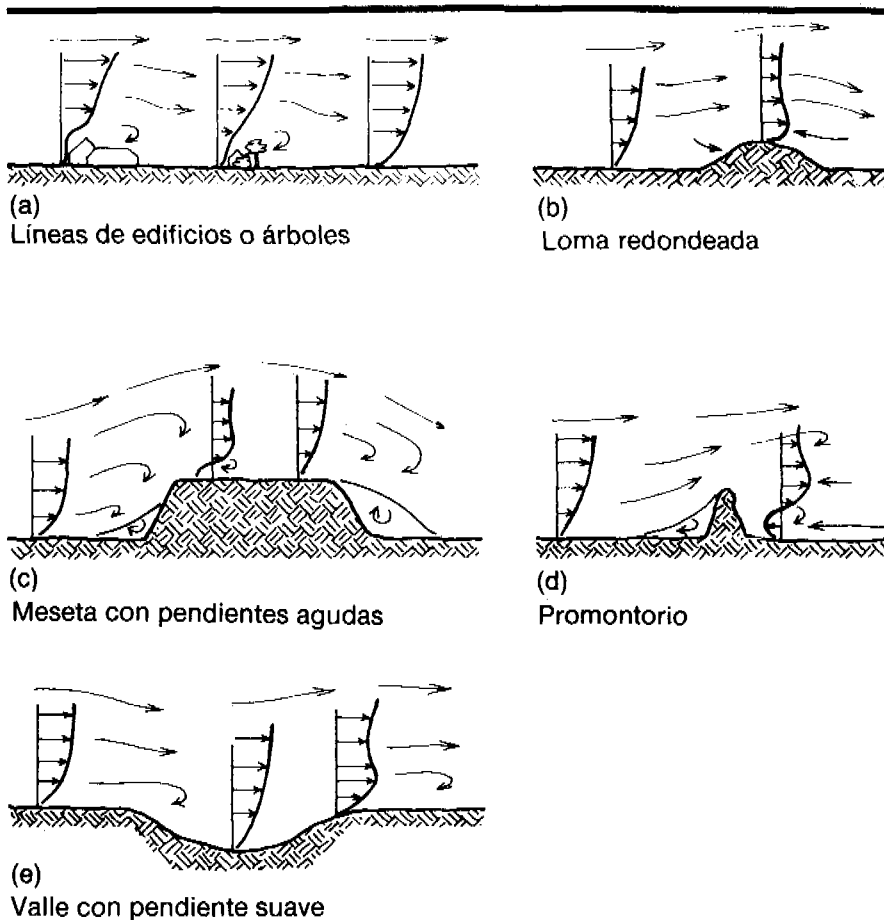


Figura 6.6: Efectos de varios tipos de obstrucciones y características topográficas sobre la velocidad del viento.

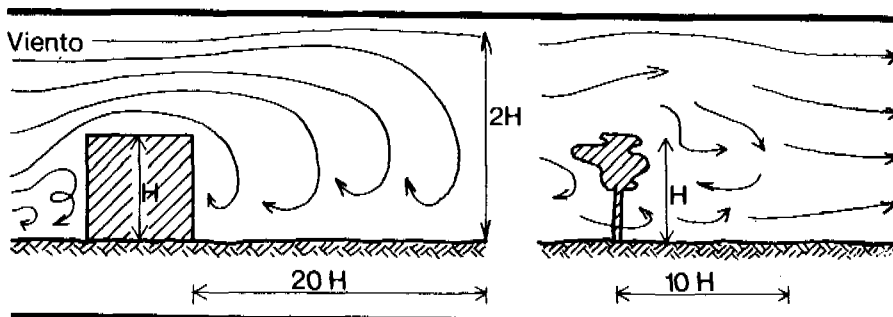


Figura 6.7: Zona de turbulencia detrás de una obstrucción.

6.8 SELECCION DEL SITIO

La selección del sitio no es crítica en tierra plana, pero en áreas de loma o montaña donde existen variaciones considerables en la velocidad del viento, debe tenerse en cuenta esta variabilidad local al seleccionar el sitio para la bomba eólica. Las líneas de árboles, los edificios, y otras obstrucciones, reducen grandemente la velocidad del viento disponible viento abajo. Los efectos de varios tipos de obstrucción y fenómenos topográficos están mostrados en la Figura número 6.6.

Cerca de la superficie de la tierra, el flujo del viento se modifica. El viento que sopla alrededor de edificios o por encima de superficies rugosas probablemente tendrá un patrón turbulento, lo cual reduce considerablemente la potencia que un rotor puede extraerle. Viento abajo de líneas de árboles o obstrucciones similares, la turbulencia puede ocurrir sobre distancias entre 10 y 20 veces la altura de estas obstrucciones (Figura 6.7).

La capacidad de salida de la bomba eólica debe ser acoplada a la producción de la fuente de agua. Básicamente, la capacidad de bombeo debe ser menor que la producción segura de la fuente de la cual se bombea el agua. Si la capacidad de la bomba eólica es mayor, la fuente se secará, y la bomba se desgastará rápidamente.

6.9 DISEÑO

La potencia de salida de una bomba eólica usualmente se presenta en un diagrama llamado curva de potencia, la cual muestra la relación entre la potencia hidráulica de salida y la velocidad del viento (Figura 6.8). La bomba comienza a operar a la velocidad del viento de "entrada" (V_{en}). A mayores velocidades, la potencia hidráulica de salida aumenta hasta llegar a la velocidad de viento máxima (V_m), donde se obtiene la máxima potencia. En la mayoría de sistemas de bombeo eólico, se activa un elemento de control en ese momento, lo cual limita la velocidad rotacional del rotor y la bomba. A esta velocidad limitada del rotor, la bomba puede seguir operando hasta llegar a la velocidad de viento de "salida" V_{sal} . En este punto se debe parar el rotor o retirarlo de la acción del viento, para prevenir daños.

Para trabajar eficientemente, la bomba eólica debe ser diseñada para una potencia máxima de salida en el rango prevalente de velocidades de viento. La potencia de salida a la velocidad de diseño (V_d) se llama la potencia de diseño (P_d). La velocidad de diseño generalmente está en un rango entre 0.8 y 1.3 veces la velocidad promedio anual del viento.

Los valores de la curva de potencia generalmente están en los siguientes rangos:

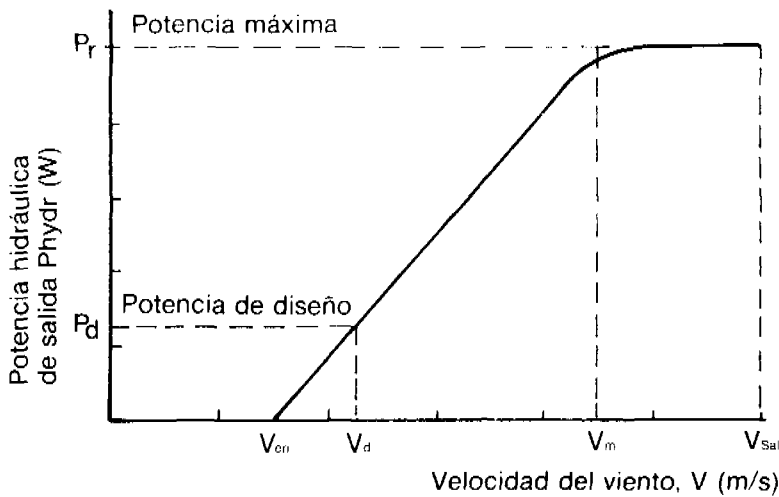


Figura 6.8: Curva de potencia para una bomba eólica.

- V_{en} = aproximadamente $2/3 V_d$
- V_d = 3 - 5 m/s
- V_m = 8 - 10 m/s
- V_{sal} = 12 - 16 m/s

Para que una bomba eólica comience a operar, la velocidad del viento debe ser lo suficientemente alta para producir el torque de arranque. Una vez haya arrancado, la bomba necesitará menos energía eólica para seguir funcionando. El torque de arranque es una consideración importante en la escogencia de la bomba. Por ejemplo, una bomba de pistón normalmente tiene un torque de arranque aproximadamente 3 veces mayor que el promedio requerido durante su funcionamiento, mientras que el torque de arranque de una bomba rotatoria es sólo aproximadamente 1.5 veces el torque promedio.

6.10 ESTIMACION DE LA POTENCIA HIDRAULICA DE SALIDA

Se puede hacer una estimación aproximada de la potencia hidráulica promedio de salida de una bomba eólica, con la siguiente ecuación:

$$\bar{P} = 0.1 A \cdot \bar{V}^3$$

Donde:

\bar{P} = potencia hidráulica promedio de salida (W)

A = área barrida por el rotor (m²)

\bar{V} = velocidad promedio del viento (m/s)

En esta ecuación, las dimensiones no concuerdan, y es sólo válida para bombas eólicas en las cuales el rotor y la bomba están bien apareados, y en sitios donde la velocidad promedio del viento no varía mucho del valor de la velocidad de diseño.

Ejemplo:

Una bomba eólica con un rotor de 5 metros de diámetro en un sitio con una velocidad promedio de viento de 5 m/s debe producir una potencia hidráulica de salida promedio de aproximadamente 245 W. Operando 24 horas por día, esta bomba eólica podría producir aproximadamente 6 kWh de energía hidráulica de salida por día. Esto corresponde a un bombeo de aproximadamente 50 m³/d contra una cabeza de 40 metros, o 200 m³/d contra una cabeza de 10 metros.

Se puede usar el diagrama presentado en la Figura 6.9 para estimar la potencia hidráulica promedio de salida para bombas eólicas de diferentes tamaños y operando bajo varias condiciones de velocidad promedio y cabeza de bombeo.

Para determinar con precisión la energía hidráulica de salida de una bomba eólica se puede utilizar el siguiente método: se prepara un histograma de distribución de frecuencias y se multiplica por la curva de potencia de la bomba eólica para dar un histograma de energía hidráulica entregada (ver Figura 6.10). La energía total entregada durante el período de análisis puede entonces determinarse sumando todas las columnas en el histograma.

La energía hidráulica anual de salida de una bomba eólica también puede ser estimada aproximadamente usando la siguiente ecuación:

$$\bar{E}_{\text{hidr}} = 0.9 \bar{V}^3 \cdot A$$

\bar{E}_{hidr} = energía hidráulica entregada anualmente (kWh/año)

\bar{V} = velocidad promedio del viento (m/s)

A = área barrida por el rotor (m²)

6.11 MANTENIMIENTO

Ocasionalmente, se deben lubricar las balineras, apretar la tornillería y hacer ajustes y reparaciones menores. Se debe hacer una revisión completa y posiblemente una reconstrucción una vez cada 2 ó 3 años. Dependiendo de la calidad

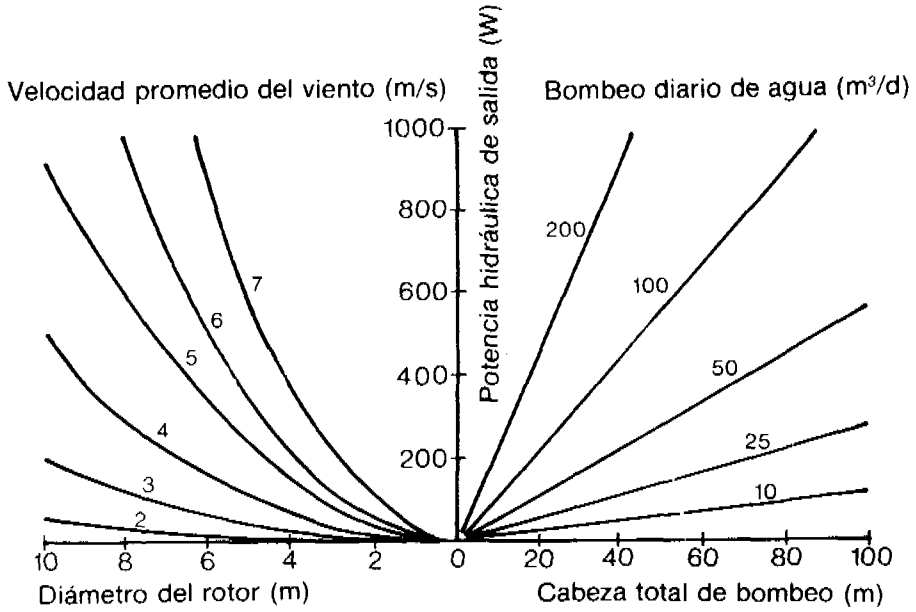


Figura 6.9: Estimación de potencia hidráulica promedio de salida de una bomba eólica. (Rastogi, 1982a).

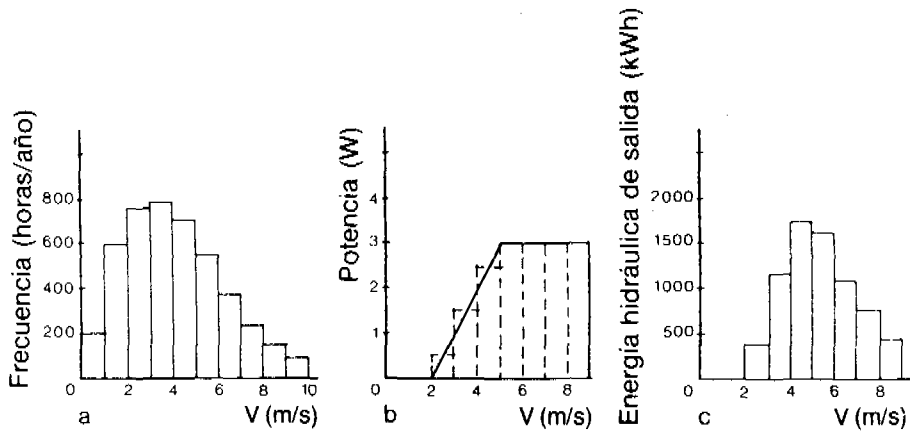


Figura 6.10: Determinación de la energía hidráulica de salida para bomba eólica. (Rastogi, 1982b).

del agua que se bombea, los sellos y otras partes móviles de la bomba pueden requerir un mantenimiento más frecuente. Si la bomba está equipada con una caja de engranajes, esta caja debe ser inspeccionada regularmente, aproximadamente cada dos meses.

Si se usan rodamientos convencionales en el eje del rotor, se requiere lubricarlos o engrasarlos a intervalos regulares.

BIBLIOGRAFIA

- BEURSKENS, H. J. M. (1978). Feasibility study of windmills for water supply in Mara Region, Tanzania (Publication SWD 78-4). Amersfoort, The Netherlands, Steering Committee Wind Energy Developing Countries.
- BEURSKENS, H. J. M. (1981). Wind energy for water pumping in Cape Verde (Publication SWD 81-1). Amersfoort, The Netherlands, Steering Committee Wind Energy Developing Countries.
- BLAKE, S. (1978). *Wind-driven water pumps*. Washington, DC, USA, World Bank.
- BLANC, M. LE (1976). Utilization of wind power for water pumping. Paris, France, Groupe de Recherche et d'Exchanges Technologiques (GRET).
- BOTH, D. and STELT, L. E. R. VAN DER (1983). Catalogue of wind machines (Publication SWD 83-1). Amersfoort, The Netherlands, Steering Committee Wind Energy Developing Countries.
- DEMPSTER (sin fecha). Sales literature. Nebraska, USA, Dempster Industries.
- ESCAP (1981). Renewable sources of energy, Vol. III; Wind energy. Bangkok, Thailand, United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP).
- EXELL, R.H. B., THAVAPALACHANDRAN, S., and MUKHIA, P. (1981). The availability of wind energy in Thailand (AIT Research Report No. 134). Bangkok, Thailand, Renewable Energy Resources Information Centre.
- GAY, B., BRUYERE, P., and SARDA, J. (1984). Les coliennes de pompage (Dossier "Le Point Sur" No 1). Paris, France, Groupe de Recherche et d'Exchanges Technologiques (GRET).
- GOURIERES, D. LE (1982). *Energie eolienne*. Paris, France, editions Eyrolles.
- Hamis, Yahia H., and Jansen, W.A.M. (1980). Wind energy in Sudan (Publication SWD 81-2). Amersfoort, The Netherlands, Steering Committee Wind Energy Developing Countries.
- HIRSCHBERG, G. (1982). *Water pumping windmill book*. Hanover, Massachusetts, USA, Brick House Publishing Company.
- JANSEN, W. A. M. (1980). Feasibility Study of windmills for water supply in Yemen Arab Republic (Publication SWD 80-5). Amersfoort, The Netherlands, Steering Committee Wind Energy Developing Countries.

- KLAVER, E. C. (1977). Static and dynamic loadings on the tower of a windmill (Publication SWD 77-2). Amersfoort, The Netherlands, Steering Committee Wind Energy Developing Countries.
- LIEROP, W. E. Van, and VELDHUIZEN, L. R. Van (1982). Wind energy development in Kenya (Publication SWD 82-3). Amersfoort, The Netherlands, Steering Committee Wind Energy Developing Countries.
- LYSEN, E. H., BOSS H. G., and CORDEN, E. H. (1978). Savonius rotors for water pumping (Publication SWD 78-2). Amersfoort, The Netherlands, Steering Committee Wind Energy Developing Countries.
- LYSEN, E. H. (1983). Introduction to wind energy (publicatin SWD 83-1). Amersfoort, The Netherlands, Steering Committee Wind Energy Developing Countries.
- MCGUIGAN, D. (1978). Small-scale wind power. Dorchester, Dorset, UK, Prism Press.
- OPONDO, M. N. (1981). Water pumping by wind energy in Kenya. in: Rural water supply in developing countries, proceedings of training workshop held in Zomba, Malawi, 5-12 August 1980. Ottawa, Canada, International Development Research Centre.
- PARK, J. (1981). The wind power book. Palo Alto, California, USA, Cheshire Books.
- RASTOGI, T. (1982a). Wind pump handbook. Bombay, India, Tata Energy Research Institute.
- RASTOGI, T. (1982b). Review of literature on promotion of wind pumps. Bombay, India, Tata Energy Research Institute.
- SHERMAN, M. M. (1977). Practical applications of wind- powered water pumps. Bangkok, Thailand, United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP).
- UNESCO (1981). The potential use of wind energy (UNESCO Courier No. 101). Paris, France, United Nations Education and Science Organization.
- VINAYAGALINGAM, T., and SIVASEGARAN, S. (1979). A variable stroke wind-operated water pumping system. Wind Engineerig, 3, 2, 127-131.
- WMO (1978). Meteorological aspects of the utilization of wind as an energy source (Technical Note No. 143). Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization.

7. Energía hidráulica

La energía hidráulica es la energía del agua en movimiento. La cantidad de potencia hidráulica disponible depende de la caída y del caudal. Los principales tipos de equipos de bombeo movidos por energía hidráulica utilizados en suministros de agua para comunidades pequeñas son: bombas de ariete hidráulico, turbinas hidráulicas, y bombas de corriente de río. Estas bombas pueden operar continuamente sin un suministro de combustible pero requieren obras civiles, tales como presas, ataguías, estructuras de entrada y tuberías, cuyo tamaño y costos dependen de las condiciones de cada sitio.

7.1 BOMBAS DE ARIETE HIDRAULICO

En todo el mundo, se han instalado bombas de ariete hidráulico para suministrar agua a aldeas y viviendas en el campo, y han dado un servicio largo y confiable. Estas bombas operan por el principio de crear un aumento súbito de presión, o golpe de ariete, en el tubo de entrada, al detenerse súbitamente el agua que fluye a través de él (Figura 7.1).

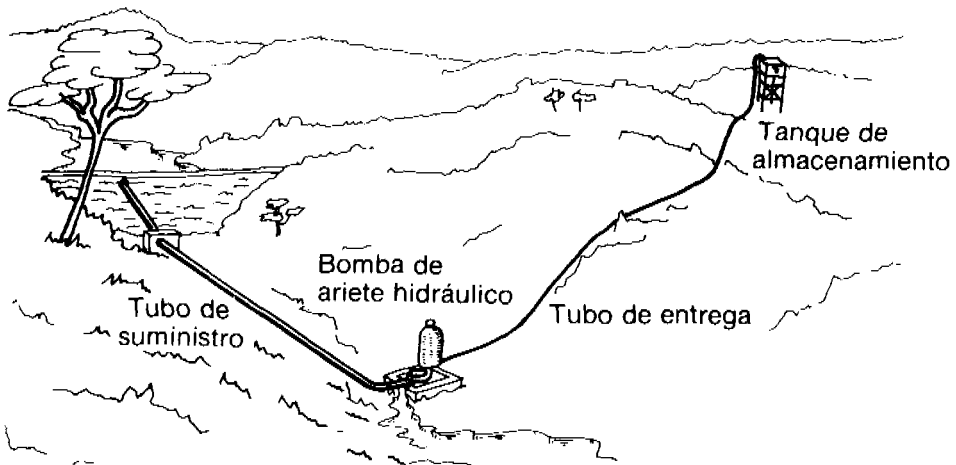


Figura 7.1: Instalación típica de una bomba de ariete hidráulico.

El suministro de agua de la fuente debe ser uniforme y continuo para la operación de la bomba de ariete hidráulico. Las áreas de lomas o de montañas, con un buen suministro de agua en movimiento son los sitios apropiados. Estas bombas pueden operar con un flujo tan pequeño como 4 litros/minuto, siempre y cuando la caída sea suficiente. Alternativamente, si el flujo de agua es relativamente grande, una caída de 0.8 metros es suficiente para operar una bomba de ariete.

El tubo inclinado que alimenta el agua desde la fuente hasta la bomba de ariete se llama tubo de entrada o de suministro. La parte móvil esencial de la bomba es la válvula de impulso, la cual, al abrirse, permite que el flujo del agua en el tubo de entrada gane velocidad y potencia. El cierre súbito de esta válvula hace que el flujo pare y de esta forma crea el aumento de presión en el tubo de entrada, el cual se convierte en potencia para bombear agua.

Las bombas de ariete hidráulico hechas en fundición son construidas robustamente de materiales rígidos (Figura 7.2). Cuando están correctamente instaladas, estas bombas son muy confiables y pueden alzar agua contra cabezas de bombeo considerables. Pueden trabajar satisfactoriamente durante muchos años y requieren únicamente un mantenimiento limitado.

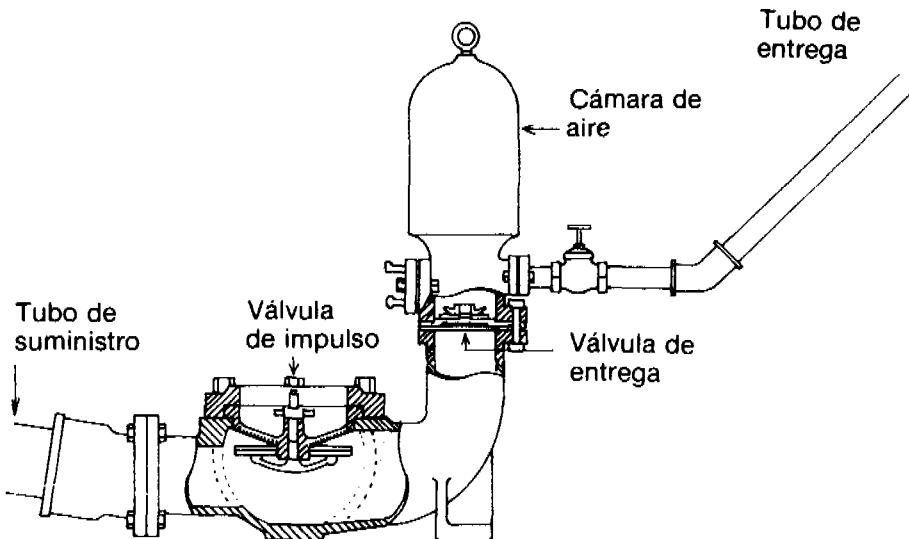


Figura 7.2: Ejemplo de una bomba de ariete hidráulico (John Blake Ltd.)

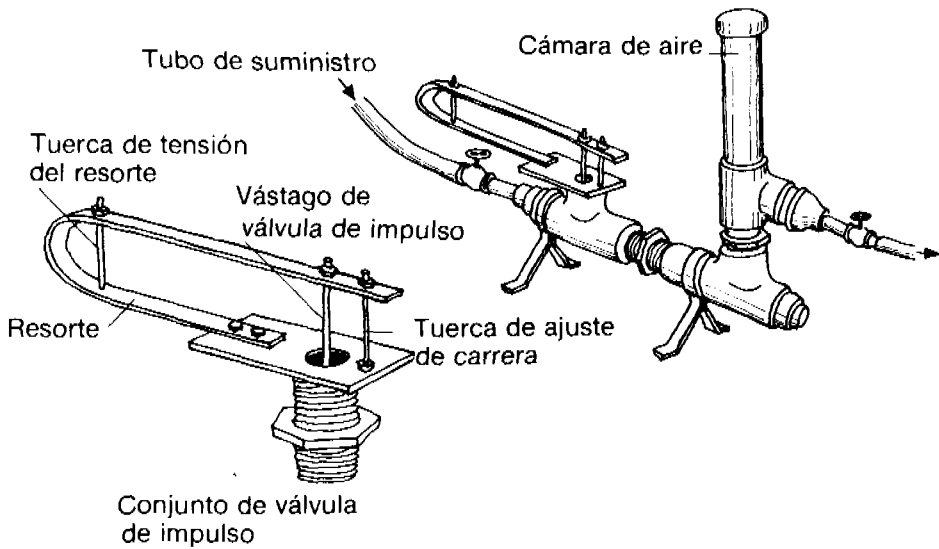


Figura 7.3: Ejemplo de una bomba de ariete hidráulico de bajo costo. (Watt, 1975).

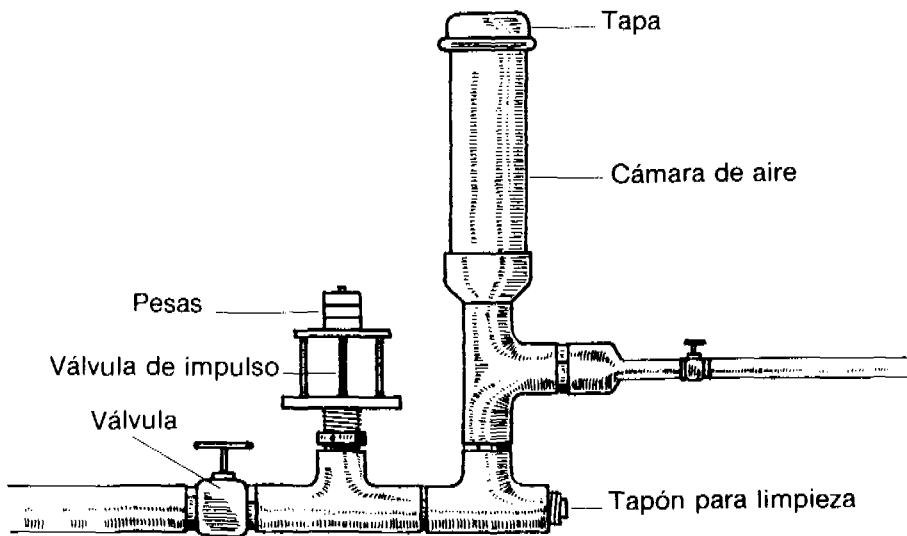


Figura 7.4: Ejemplo de bomba de ariete hidráulico construida de componentes estándar (Watt, 1975).

Se puede fabricar un buen número de bombas de ariete hidráulico, de bajo costo, con materiales que se consiguen localmente. Algunos de estos diseños usan componentes que se pueden conseguir del estante de cualquier ferretería, tal como lo muestran las Figuras 7.3 y 7.4. Las bombas de ariete hidráulico fabricadas localmente generalmente son mucho más baratas que las bombas importadas fabricadas en fundición. Sin embargo, el ahorro en costos con estas bombas no es muy grande, puesto que el costo de las bombas de ariete es sólo una proporción pequeña del costo total de la instalación.

Operación

Al comienzo del ciclo de bombeo, el agua de la fuente baja rápidamente por el tubo de entrada, ganando velocidad y potencia y pasa a través del cuerpo de la bomba, escapando finalmente a través de la válvula de impulso (Figura 7.5a). A medida que el flujo a través de la válvula se vuelve más rápido, la presión hidráulica sobre la válvula aumenta hasta que excede el peso de la válvula, o la carga del resorte que sostiene la válvula, y se le obliga a cerrar súbitamente. La columna de agua en movimiento se para instantáneamente, y se crea un aumento súbito de presión en el tubo de alimentación. Esto obliga a que la válvula de entrega se abra y el agua fluya a través de esta válvula abierta a la cámara de aire (Figura 7.5B). Este flujo continúa hasta que la energía del salto de presión se haya acabado. La válvula de impulso se abre entonces, debido a su propio peso o a la carga del resorte, y el agua de la fuente nuevamente empieza a correr a través del tubo de entrada, comenzando un nuevo ciclo de bombeo (Figura 7.5A). La mayoría de las bombas de ariete hidráulico opera de 30 a 100 ciclos por minuto, dependiendo del peso o la tensión del resorte en su válvula de impulso.

La cámara de aire amortigua los pulsos de presión del agua que entra en ella, y de esa forma asegura que el flujo sea relativamente continuo en la tubería de entrega (Figura 7.5C). Una pequeña válvula de aire va fija a la carcasa de la bomba. Durante cada ciclo de bombeo, se aspira una pequeña cantidad de aire por ella. Esto es esencial, porque parte del aire se disuelve en el agua y sale de la cámara de aire con el agua bombeada. Si no se reemplaza este aire perdido, la cámara de aire se llenaría de agua y la bomba de ariete hidráulico dejaría de operar.

Las bombas de ariete hidráulico no arrancan solas. Usualmente, se opera la válvula de impulso manualmente hasta que la bomba comience a trabajar por la acción del impulso del agua.

Los requerimientos de operación y mantenimiento de las bombas de ariete hidráulico están limitados a:

- Ajustar la válvula de impulso ocasionalmente;
- Revisar el funcionamiento de la válvula de suministro regularmente;
- Reemplazar los sellos de la válvula ocasionalmente;
- Apretar tornillos ocasionalmente.

Periódicamente, la bomba de ariete puede ser desmontada para su limpieza, debido a la formación de depósitos de arena y limos en la carcasa y en las válvulas de impulso y suministro. Para prevenir la entrada de basura al tubo de entrada, normalmente se le pone algún tipo de rejilla.

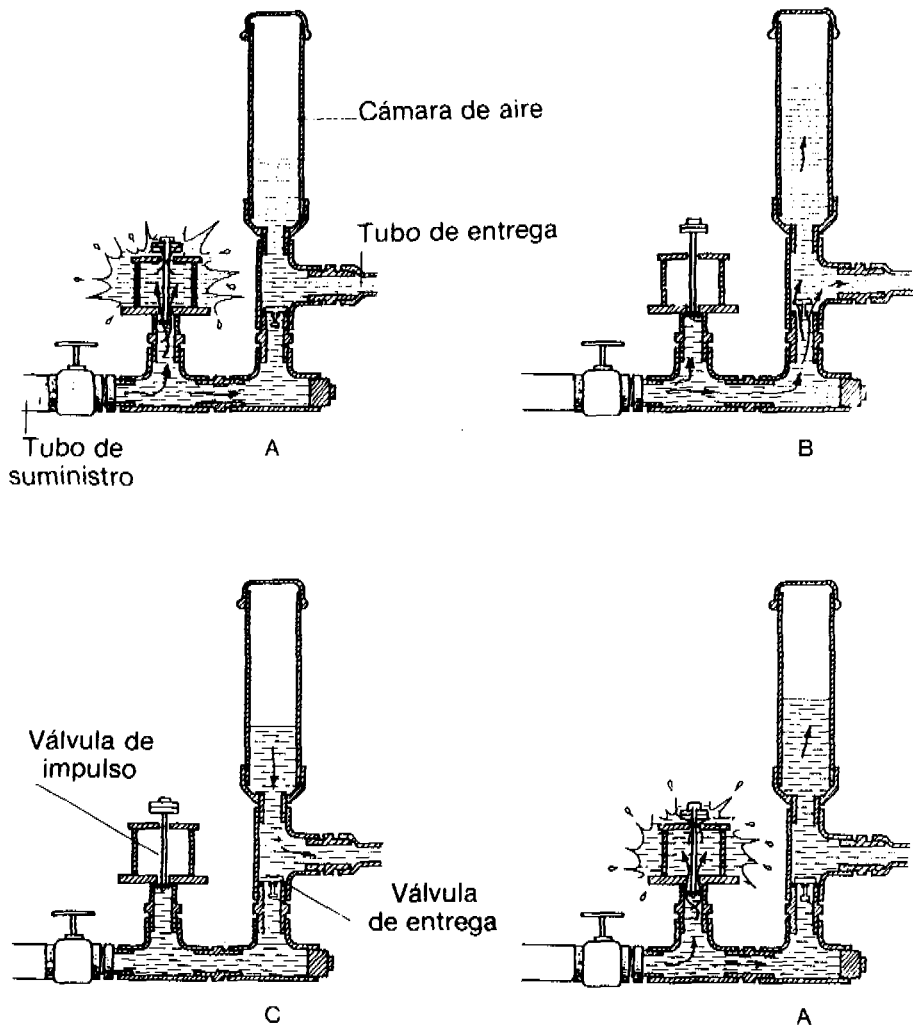


Figura 7.5: Operación de la bomba de ariete hidráulico.

Diseño

La Figura 7.6 muestra los parámetros de diseño para las instalaciones de bombas de ariete hidráulico. El caudal del agua de la fuente (Q) y la cabeza de suministro (H) determinan la combinación de caudal entregado (q) y la cabeza de entrega (h) que puede producir la bomba. Esto se indica en la Tabla 7.1.

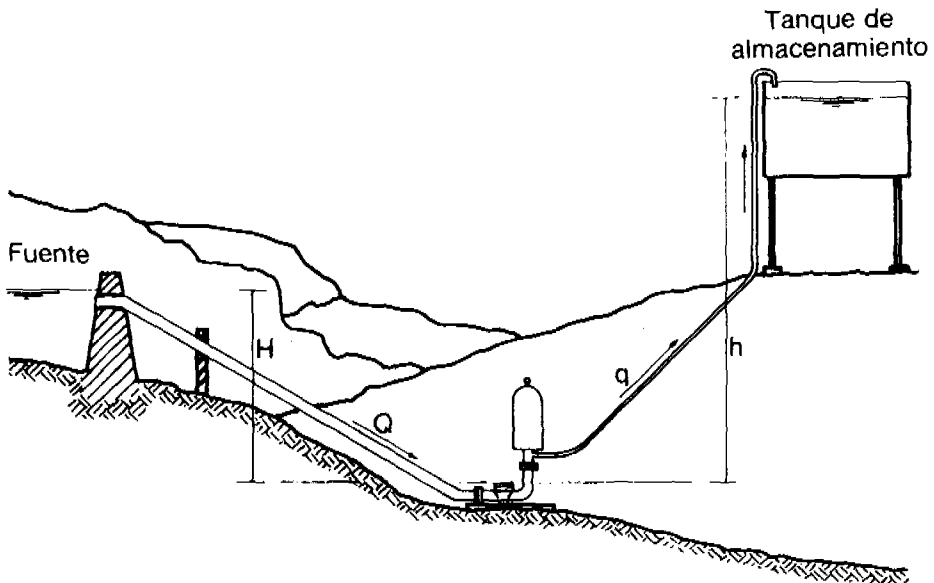


Figura 7.6: Parámetros de diseño para una instalación de bomba de ariete hidráulico.

Tabla 7.1: Caudal de agua entregado (q) como proporción del caudal de entrada (Q) para bombas de ariete hidráulico operando bajo varias combinaciones de cabezas de suministro (H) y de entrega (h).

h/H	2	3	4	5	6	7	8	9	10
q/Q	0.40	0.26	0.18	0.13	0.11	0.085	0.07	0.06	0.05

Ejemplo:

Cabeza de suministro $H = 5$ m
Cabeza de entrega $h = 45$ m
Caudal de suministro $Q = 100$ l/min

La razón de cabeza de entrega a cabeza de suministro (h/H) es 9. Según la Tabla 7.1, el caudal de entrega (q) sería de aproximadamente 0.06×100 L/min, ó 6 L/min, lo cual equivale a 8.6 m³ diarios en operación continua.

La potencia hidráulica disponible, en el flujo de agua de suministro (P_{en}), puede ser calculada por la ecuación:

$$P_{en} = \rho_w \cdot g \cdot Q \cdot H$$

La potencia hidráulica de salida (P_{sal}) producida por la bomba de ariete hidráulico se calcula como:

$$P_{sal} = \rho_w \cdot g \cdot q \cdot (h-H)$$

En consecuencia, la eficiencia de operación (Eficiencia Rankine) de una bomba de ariete hidráulico es:

$$\eta = \frac{q \cdot (h-H)}{Q \cdot H}$$

Donde:

η = eficiencia operacional (decimal)
 h = cabeza de entrega (m)
 H = cabeza de suministro (m)
 q = caudal de entrega (l/min)
 Q = caudal de suministro (l/min)

La eficiencia operacional (Rankine) de la bomba de ariete del ejemplo es:

$$\eta = \frac{6 \cdot (45-5)}{100 \cdot 5} = 48\%$$

Frecuentemente, los fabricantes calculan la eficiencia con la ecuación:

$$E = \frac{q \cdot h}{Q \cdot H}$$

Esto da un valor de eficiencia ligeramente mayor que la eficiencia Rankine; en el ejemplo sería de un 54%.

Si el caudal de entrega requerido es mayor que el que pueda suministrar una bomba de ariete bajo las condiciones dadas, se puede instalar un número de bombas en paralelo, siempre y cuando el flujo suministrado por la fuente sea suficiente para moverlas todas. Cada unidad debe tener su propio tubo de entrada, pero el agua puede ser entregada mediante un tubo de entrega común (Figura 7.7).

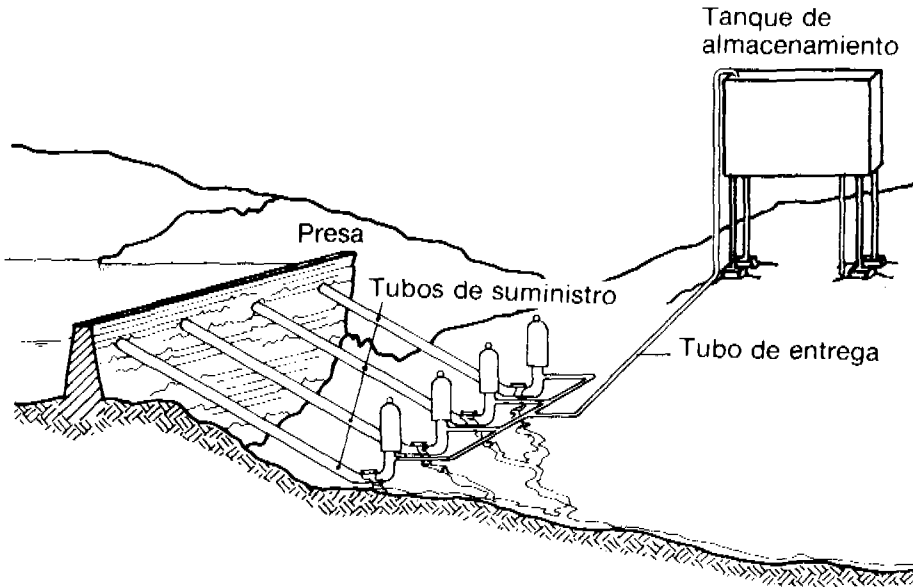


Figura 7.7: Bombas de ariete hidráulico operando en paralelo.

7.2 BOMBAS DE TURBINA

Las bombas de turbina se usan ampliamente en la República Popular China. Aunque son un desarrollo relativamente reciente, del comienzo de la década de 1960, se han instalado unas 90.000 bombas de turbina, la mayoría para propósitos de riego. Las turbinas de agua operan a una velocidad rotacional relativamente alta, convirtiendo la potencia hidráulica en potencia mecánica rotacional para mover la bomba. El eje de la turbina está acoplado directamente a la

bomba. Esencialmente, una bomba de turbina consiste en una turbina de agua con una bomba centrífuga montada inmediatamente encima de la turbina y sobre el mismo eje (Figura 7.8). La turbina opera bajo el agua y es impulsada por el agua que fluye a través de ella. Usualmente, es una turbina de hélice de flujo axial con aletas fijas que gira dentro de una carcasa con álabes, fijos o ajustables, de guía. La estructura de apoyo sobre la cual está instalada, usualmente está sobre un canal que tiene una compuerta para controlar el flujo del agua. Se consigue un amplio rango de bombas de turbina para diversas condiciones y requerimientos. Los ríos, quebradas o canales con flujos mínimos de agua de 15 l/s, donde se pueda obtener una caída de por lo menos 0.5 m, proveen condiciones satisfactorias para instalar las bombas de turbina.

Los análisis de costos basados en los datos limitados que se consiguen en la China, muestran que las bombas de turbina son significativamente más baratas

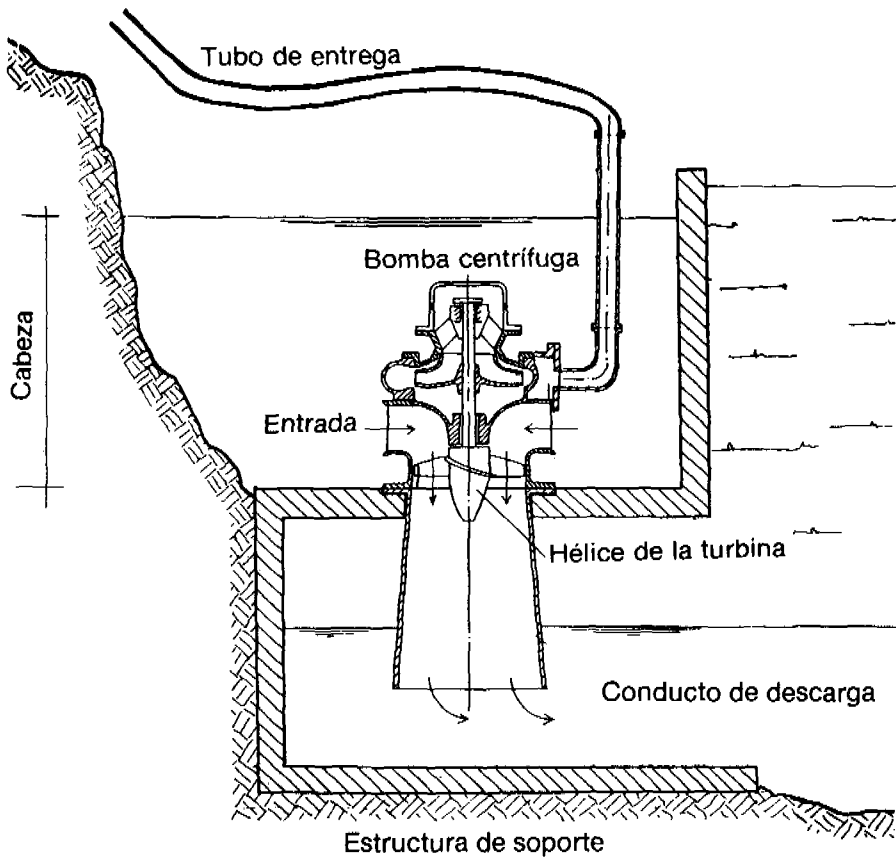


Figura 7.8: Partes principales de una bomba de turbina desarrollada en la China (Collett, 1982).

por kWh de energía hidráulica entregada, que las bombas eléctricas o Diesel. En consecuencia, se puede esperar que las bombas de turbina sean económicamente atractivas en la mayoría de situaciones donde las condiciones sean apropiadas para su uso.

Las turbinas con aspas fijas sólo son eficientes en un reducido rango de caudales. En los sitios donde el flujo de entrada varía considerablemente, es ventajoso instalar varias turbinas pequeñas en vez de una turbina grande, porque entonces se puede operar cada unidad individualmente con el caudal para el cual ha sido diseñada. Es una buena práctica, instalar por lo menos dos unidades, una con capacidad dos veces más grande que la otra. En este arreglo, la unidad mayor puede ser operada con caudales de aproximadamente $2/3$ del flujo máximo, y la unidad menor con $1/3$ del caudal máximo. Entonces sería posible una operación eficiente a $1/3$ del caudal máximo con la unidad más pequeña, a $2/3$ del caudal máximo con la unidad más grande, y al flujo máximo cuando las dos unidades operan simultáneamente.

7.3 BOMBAS DE CORRIENTE DE RIO

Existe un número de bombas de corriente de río o bombas que se introducen a una quebrada, las cuales usan la energía cinética de la corriente del río sin la necesidad de obras civiles, tales como presas, o tuberías de carga, para mover la bomba. Ellas extraen la energía de la corriente en un río grande, en vez de usar la caída de una quebrada.

La bomba ITDG tiene un rotor de eje vertical el cual es sostenido en el río desde un planchón flotante (Figura 7.9). La potencia del rotor es transmitida mediante una correa a una bomba centrífuga pequeña, la cual entrega agua a través de una tubería flotante a un tanque en la rivera del río. Pruebas efectuadas sobre el río Juba en el Sudan del Sur han demostrado que una bomba prototipo con un rotor de aproximadamente 3 m de diámetro, que opere en una corriente de 1.0 m/s, podría suministrar aproximadamente 100 l/min contra una cabeza de 5 metros. Los cálculos de diseño indican que el agua entregada debería ser aproximadamente 300 l/min en un río con una corriente de 1.5 m/s. Los análisis de costo indican que este equipo generalmente es competitivo en costos con bombas Diesel, especialmente donde el combustible es escaso y caro.

Una bomba similar conocida como la Rio-Bomba ha sido desarrollada en Colombia para suministrar agua a comunidades ribereñas. Se ha obtenido un caudal de entrega de 50 l/min en corrientes de río de 1.0 m/s contra una cabeza de 8 metros.

La bomba Plata ha sido diseñada para bombear agua de quebradas o ríos utilizando la energía disponible de una pequeña caída. Un caudal de 30 l/s con una caída de 0.4 metros es suficiente para operar la bomba. El flujo disponible en los sitios potenciales debe ser medido para establecer si el caudal de la quebrada es suficiente, tomando en cuenta las variaciones estacionales. La cabeza máxima

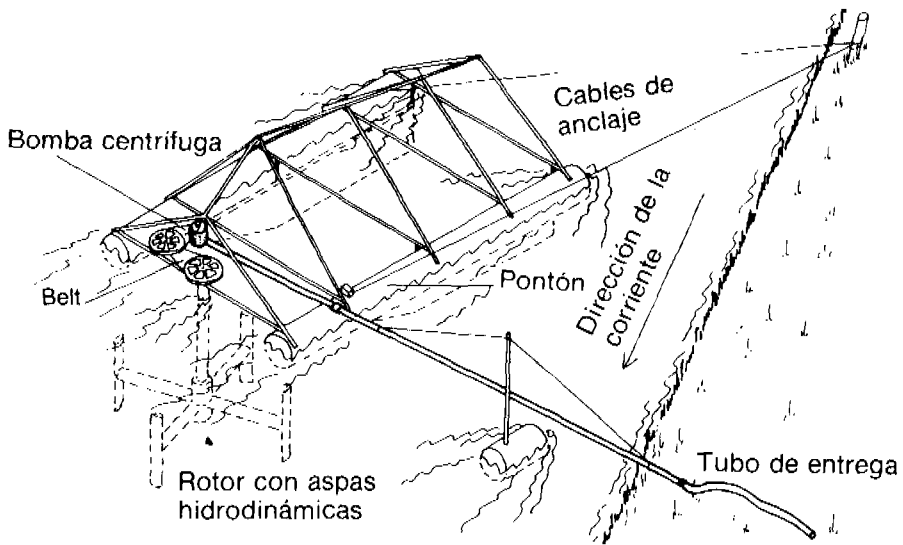


Figura 7.9: Bomba de corriente de río de ITDG (Collett, 1981).

para la bomba Plata es aproximadamente 0.9 metros. De acuerdo con los resultados de prueba, con un flujo de 85 l/s y una caída de 0.6 metros, se produce suficiente potencia para entregar un caudal de 45 l/min contra una cabeza de 3 m., o 10 l/min a una altura de 40 m. La unidad propulsora es una turbina especial de baja cabeza, en la cual los álabes de la hélice están montados en tandem. La turbina genera su máxima potencia a medio llenar, y deja de operar cuando esté completamente llena de agua. El eje se conecta por una manivela recíprocante a dos pequeñas bombas de pistón de efecto sencillo. Hay un cierto número de posiciones del disco de la manivela para ajustar la operación de la bomba a la cabeza disponible y a la capacidad de descarga en un sitio particular. Puede ser necesario construir una pequeña presa de tablas, sacos de arena o materiales similares para crear la cabeza requerida. Para evitar el daño debido a la basura que flota, la entrada en la turbina tiene una grilla en forma de delta la cual debe ser limpiada diariamente.

BIBLIOGRAFIA

- A VERTICAL-AXIS RIVER TURBINE PUMP (1977). *Appropriate Technology*, 4, 2.
- COLLETT, J. (1981). Hydropowered water-lifting devices for irrigation. in: *Proceedings of FAO/DANIDA workshop on water-lifting devices in Asia and Near East*, Bangkok, 4 - 14 December 1979. Rome, Italy, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- COLLETT, J. (1982). Chinese water-lifting devices. in: *Appropriate Technology*, 9, 2.26-28.
- ESCAP (1982). *Small hydropower development*. Bangkok, Thailand, United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP).
- FRITZ, J. (1980). *Mini-hydropower*. Washington, DC, USA, National Academy of Sciences.
- INVERSIN, A. R. (1978). A hydraulic Ram for tropical climates. Arlington Virginia, USA, Volunteers in Technical Assistance (VITA).
- INVERSIN, A. R. (1978). The construction of a hydraulic ram pump. Boroko, Papua New Guinea, South Pacific Appropriate Technology Foundation.
- JOHN BLAKE LTD. (undated). Blake hydraulic ram pump (sales literature). UK, John Blake Ltd.
- KINDEL, E. W. (1979). A hydraulic ram for village use (VITA Technical Bulletin No. 56). Arlington, Virginia, USA, Volunteers in Technical Assistance.
- MARSHALL, K. (1982). Evaluation of water-current turbines in southern Sudan, Rugby, UK, Intermediate Technology Industrial Services.
- POMPA AIR: AUTOMATIC HYDRAULIC RAM (1977). Bandung, Indonesia, Development Technology Centre, Institute of Technology.
- SILVER, M. (1978). *The use of hydraulic rams in Nepal: a guide to manufacturing and installation*. Katmandu, Nepal, UNICEF.
- TIERMERSMA, J. J., and HEEREN, N. A. (1984). *Small-scale hydropower technologies*. Amsterdam/Delft, The Netherlands, TOOL Foundation and Centre for Appropriate Technology.
- WATT, S. B. (1975). *A manual on the hydraulic ram for pumping water*. London UK, Intermediate Technology Publications Ltd.

8. *Energía de la biomasa*

Se pueden producir gases o líquidos combustibles a partir de la biomasa, tal como los desechos humanos y de animales, residuos agrícolas, caña de azúcar, yuca, eucalipto, aceite de palma, y plantas acuáticas. Estos gases o líquidos pueden ser utilizados como combustible para motores que mueven una bomba de agua. Los dos tipos principales de tecnología para la conversión de biomasa para la producción de gases o líquidos combustibles son la conversión bioquímica y la conversión termoquímica. La conversión bioquímica, o digestión, de biomasa orgánica es un proceso natural que involucra varios procesos bacterianos y enzimáticos simultáneamente. Cuando ocurre en un ambiente libre de oxígeno, la digestión es anaeróbica, y se produce un gas combustible, conocido como biogás. Líquidos ricos en energía, tales como los alcoholes, etanol y metanol, son producidos por otro proceso bioquímico de conversión de biomasa, llamado fermentación. La conversión termoquímica de la biomasa ocurre cuando ella es calentada en ausencia parcial o total del aire. Los procesos principales que ocurren son la pirólisis, en la cual el material de la biomasa es transformado mediante calentamiento, y gasificación, en el la cual se produce un gas debido a la combustión incompleta de la biomasa calentada. El gas combustible que se produce, el cual consiste en una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno y metano, es conocido como gas de producción.

8.1 PROCESOS DE PRODUCCION DE BIOGAS

El método más común de producción de biogás es la digestión anaeróbica en un tanque cerrado llamado "digestor". La biomasa se mezcla en el digestor con agua para formar una suspensión, en la cual la digestión anaeróbica se realiza en dos pasos. En el primer paso, llamado licuefacción, la materia orgánica es descompuesta por hidrólisis enzimática y fermentada para producir principalmente ácidos y alcoholes. Seguidamente, en la etapa de gasificación, las bacterias metanogénicas rompen los ácidos y los alcoholes, para producir metano y dióxido de carbono, y pequeñas cantidades de otros gases, tales como monóxido de carbono, nitrógeno y ácido sulfhídrico. El biogás contiene aproximadamente un 60% de metano y 40% de bióxido de carbono; la pequeña cantidad de ácido sulfhídrico da al gas un olor de huevos en pudrición. El valor calorífico del biogás es 20-23 MJ de energía calórica por m³ de gas.

Los procesos bacterianos y enzimáticos de la digestión anaeróbica son sensibles a variaciones en temperatura, contenido de agua, y composición general de la mezcla en el biodigestor. El biogás se produce únicamente si se excluye el aire del digestor de forma tal que se pueda desarrollar la condición anaeróbica. En consecuencia, el tanque del digestor debe estar herméticamente cerrado.

Contenido de agua de la mezcla

Si el contenido de agua de la mezcla es demasiado bajo, las bacterias y otros microorganismos no pueden funcionar efectivamente y la cantidad de biogás producido será pequeña. Si la mezcla es demasiado diluida, se puede digerir relativamente poca materia orgánica y la producción del biogás es limitada.

Si se usa primordialmente excreta humana y orines, estiércol, y desechos de agricultura como alimento para el digestor, entonces la razón de biomasa a agua debe estar entre 1:1 y 1:2. Por consiguiente, por cada 100 kg de heces y orina, se requieren entre 100 y 200 litros de agua. Si el material de alimento consta principalmente de residuos vegetales, se requiere más agua, en una razón de 1:3 o 1:4. Es esencial mezclar bien la mezcla en el tanque del digestor para promover una digestión efectiva, especialmente si se utiliza biomasa cruda con alto contenido leñoso.

Temperatura y período de retención

La temperatura de la mezcla en el digestor es un factor importante para la eficiencia del proceso de digestión. La mayoría de las bacterias anaeróbicas funcionan mejor en el rango de 30 a 35°C y esta es la temperatura óptima para producción de biogás. La temperatura en el tanque digestor siempre debe estar por encima de 20°C, porque a temperaturas menores, se produce poco biogás y por debajo de 10°C la digestión cesa completamente.

Períodos de retención de 40 a 60 días para la mezcla en el tanque del digestor son usuales para la mayoría de países tropicales. Si las temperaturas ambientes son altas, por ejemplo, en promedio entre 30 y 35°C, puede ser suficiente un período de retención más corto, de 30 a 40 días. En climas más fríos, son comunes periodos de retención más largos, de 80 a 90 días (Figura 8.1).

Acidez/alcalinidad de la mezcla

Las bacterias metanogénicas son muy sensibles a las variaciones en acidez/alcalinidad (pH) de la mezcla del digestor. Para un funcionamiento óptimo, el valor del pH de la mezcla debe mantenerse dentro del rango de 6.8 a 7.5, esto es, neutral a ligeramente alcalino. El valor del pH puede ser determinado con bastante precisión con una prueba de papel de litmus a una muestra del agua. Durante el proceso de digestión, se producen ácidos orgánicos, y si no se controlan, la mezcla en el tanque puede gradualmente tornarse ácida, estorbando seriamente los procesos bacterianos y enzimáticos de esta forma. Para mantener el pH dentro del rango deseado, deben agregarse regularmente a la mezcla materiales alcalinos, tales como cal o cenizas.

Nutrientes

El nitrógeno es esencial para el crecimiento y actividad de las bacterias. La materia prima que contiene una baja razón carbono/nitrógeno es digerida

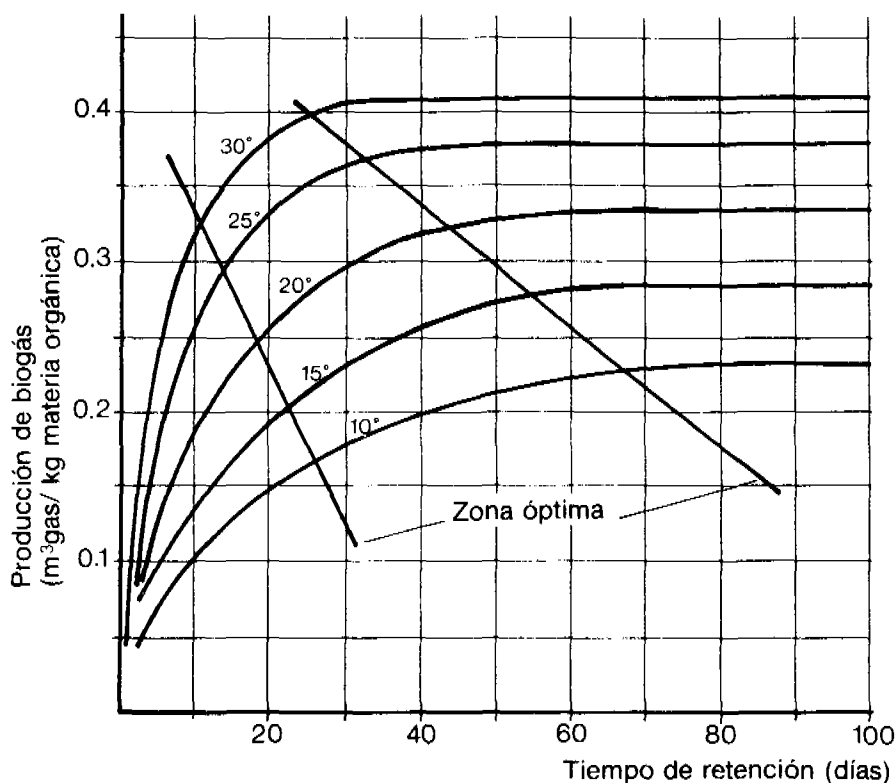


Figura 8.1: Producción de biogás como función del periodo de retención y de la temperatura. (BORDA. 1982).

fácilmente, pero los residuos agrícolas leñosos tales como la paja de trigo o de arroz (ver Tabla 8.1), requieren un suministro adicional de nitrógeno para una digestión eficiente. El alto contenido de celulosa de los pastos y residuos agrícolas hace que sean difíciles de digerir. Las heces humanas y orines, y también los desechos de animales son ricos en nitrógeno y nutrientes necesarios para el crecimiento y multiplicación de las bacterias anaeróbicas. Para una producción óptima de biogás, se deben alimentar los diversos tipos de biomasa en proporciones cuidadosamente balanceadas y mezcladas. Se recomienda que la razón carbono/nitrógeno de los materiales combinados de alimentación sea mantenido menor de 30:1. Un resumen de los rangos óptimos de los parámetros para la producción de biogás está dado en la Tabla 8.2.

Tabla 8.1: Razones carbono/nitrógeno de varios materiales de biomasa (Gary, 1979)

Materia prima	Razón carbono/nitrógeno
Paja de trigo	87:1
Paja de arroz	67:1
Estiércol fresco de ganado	25:1
Heces humanas frescas	3:1

Tabla 8.2: Parámetros para producción de biogás y rango general de valores óptimos

Parámetro	Rango óptimo
Temperatura (°C)	30-35
pH	6.8-7.5
Razón carbono/nitrógeno	20-30
Tiempo de retención (días)	40-60
Razón agua/sólidos	6-10

8.2 PLANTA DE PRODUCCION DE BIOGAS

Una planta de producción de biogás muy simple, compuesta de uno o más digestores y un tanque almacenamiento de biogás, se puede construir de tambores de petróleo (Figura 8.2). La biomasa se alimenta en lotes a los tambores de digestión, llenando uno después del otro.

Se utilizan varios tipos de plantas pequeñas de producción de biogás en la China, de las cuales se han construido varios millones desde el comienzo de la década de 1970, primordialmente en la provincia de Szechuan. La mayoría son unidades familiares de 6-10 m³, produciendo de 1-2 m³ diarios de biogás de residuos humanos y animales, a los cuales se agrega adicionalmente un poco de material vegetal. También existen decenas de miles de tamaño mediano (aproximadamente 50 m³ de volumen) y grandes (más de 100 m³ de volumen), con tasas de producción de gas del 10 al 20% del volumen del digestor por día.

El digestor circular fabricado de ladrillo o mampostería en cemento con un domo fijo es común en la China (Figura 8.3). No tiene partes metálicas a excepción de un pequeño tramo de tubo de acero para entregar el gas. Se requiere un nivel relativamente alto de conocimientos técnicos para la construcción de este tipo de digestor. En la práctica, parece que muchos de estos digestores no son completamente herméticos y la fuga del biogás es un problema común.

En India, se han instalado unas 80.000 plantas de biogás pequeñas, de 8-10 m³ de volumen, la mayoría de las cuales produce biogás a partir de estiércol de vaca.

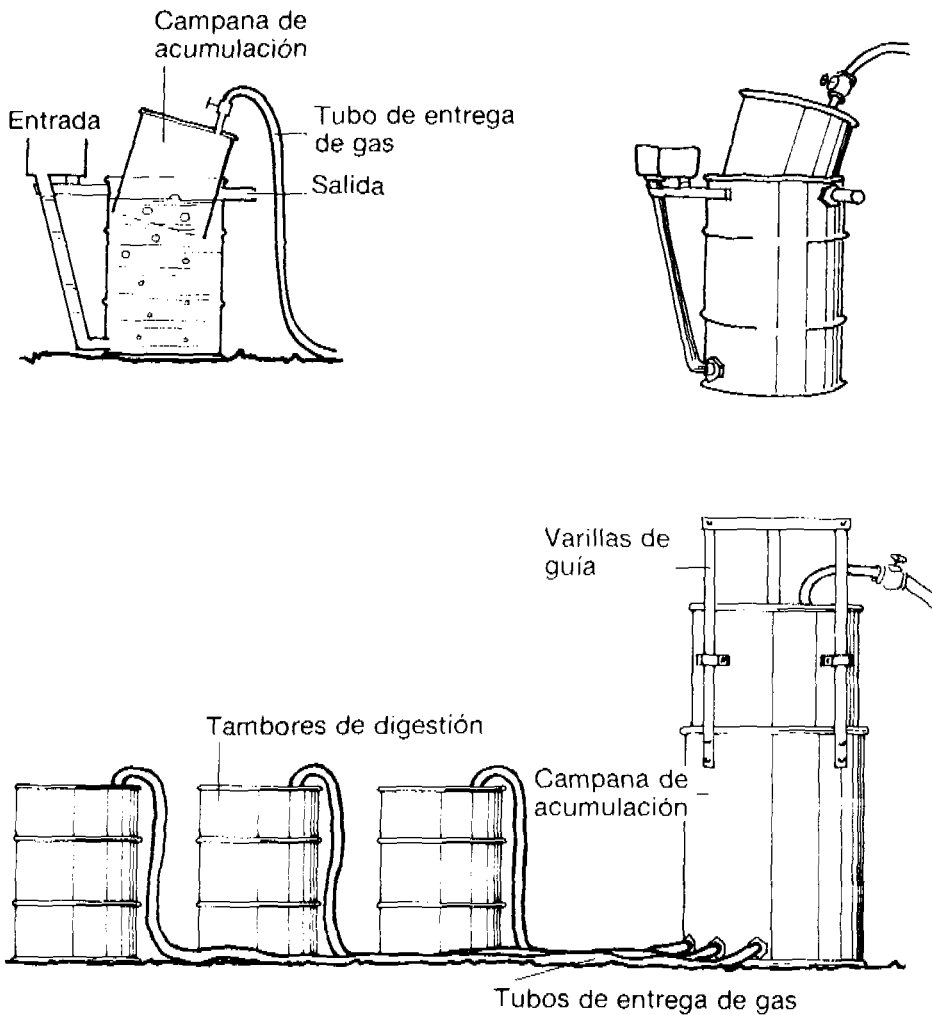


Figura 8.2: Planta de producción de biogás básica que usa tambores como digestores.

Esta planta ha sido llamada el digestor KVIC, en honor a la Khadi and Village Industries Commission la cual lo promueve. El tanque del digestor es un cilindro de concreto parcialmente bajo tierra, y tiene una altura de 2.5 a 4 veces mayor que su diámetro (Figura 8.4). Las tasas de producción de gas logradas con este diseño de digestor son del 20 al 30% del volumen del digestor por día. Se coloca

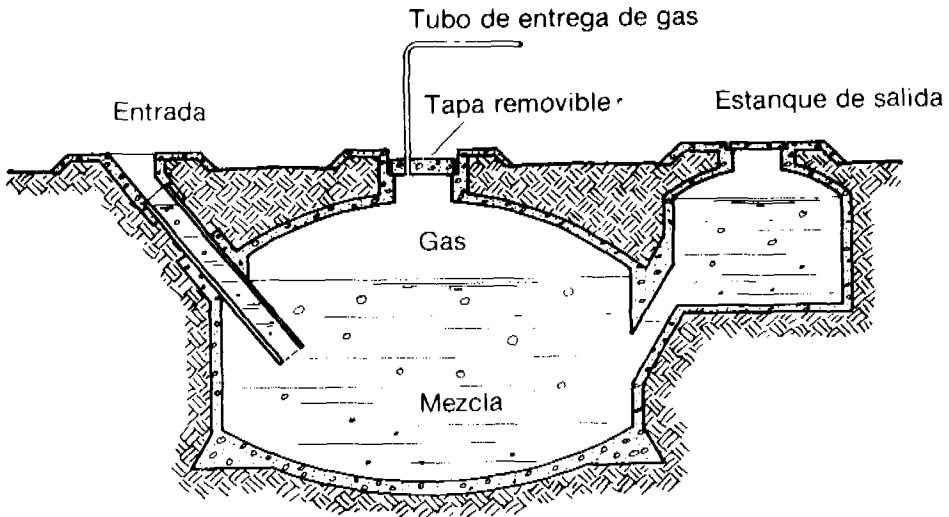


Figura 8.3: Digestor circular de domo fijo usado en la China (McGarry, 1978).

un domo invertido en acero sobre la mezcla del digestor para recoger el gas producido. En la medida en que se acumula el gas, el tanque de acumulación sube. La capacidad recomendada del tanque de almacenamiento es del 50 al 60% de la producción diaria de gas.

Se ha desarrollado un tipo de digestor parecido en India, el cual se conoce como el digestor Janata. Una tapa fija en forma de domo construido sobre el digestor sirve para el almacenamiento del gas (Figura 8.5). Su diseño sencillo, el cual puede ser construido sin la necesidad de un domo de acero, hace que este sea una alternativa atractiva.

En Pakistán, se ha desarrollado una planta de producción de biogás la cual tiene un sello externo de agua alrededor de la campana colectora de gas para eliminar los malos olores, y para reducir la acción corrosiva del ácido sulfhídrico contenido en el biogás (Figura 8.6). Este diseño reduce las pérdidas de gas y los costos de mantenimiento, pero es relativamente caro de construir.

Una planta sencilla para la producción de biogás, usando una bolsa flexible tanto para el digestor como para acumular el gas, ha sido desarrollada en Botswana (Figura 8.7). Estas unidades, las cuales varían en tamaño de 10 a 400 m³ en volumen, son fáciles de transportar, sencillas de instalar y baratas de construir. En las Filipinas, se construye una planta de producción de biogás con un tanque digestor de dos compartimientos (Figura 8.8). La mayoría del lodo se asienta en el primer compartimiento, previniendo de esta forma el bloqueo del tubo de conexión al segundo compartimiento. Se usa un acumulador de gas flotante.

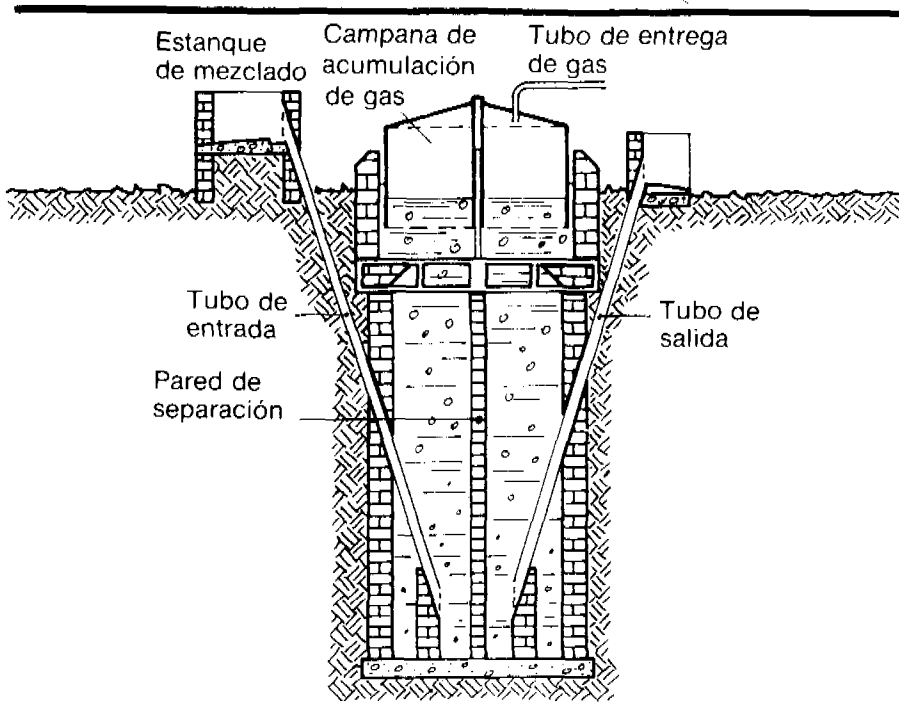


Figura 8.4: Digestor KVIC con campana de acumulación de biogás flotante (Tam, 1983).

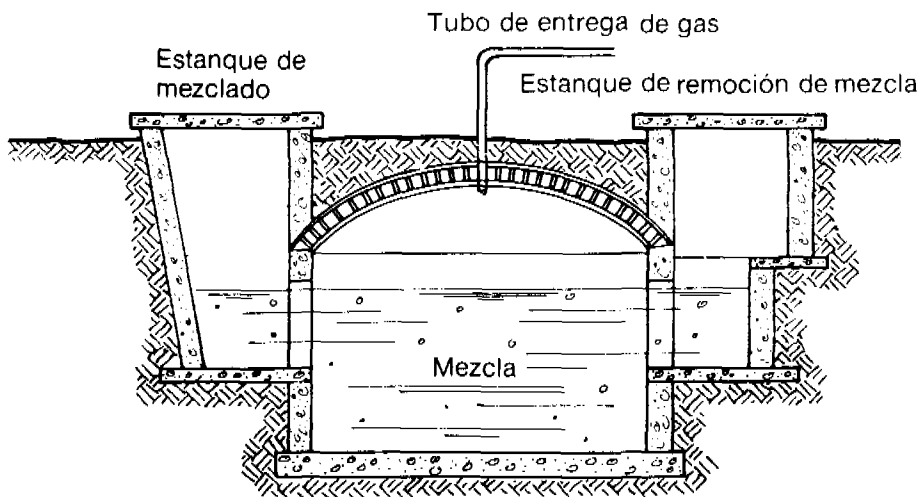


Figura 8.5: Digestor Janata con domo fijo (Barnett, 1978).

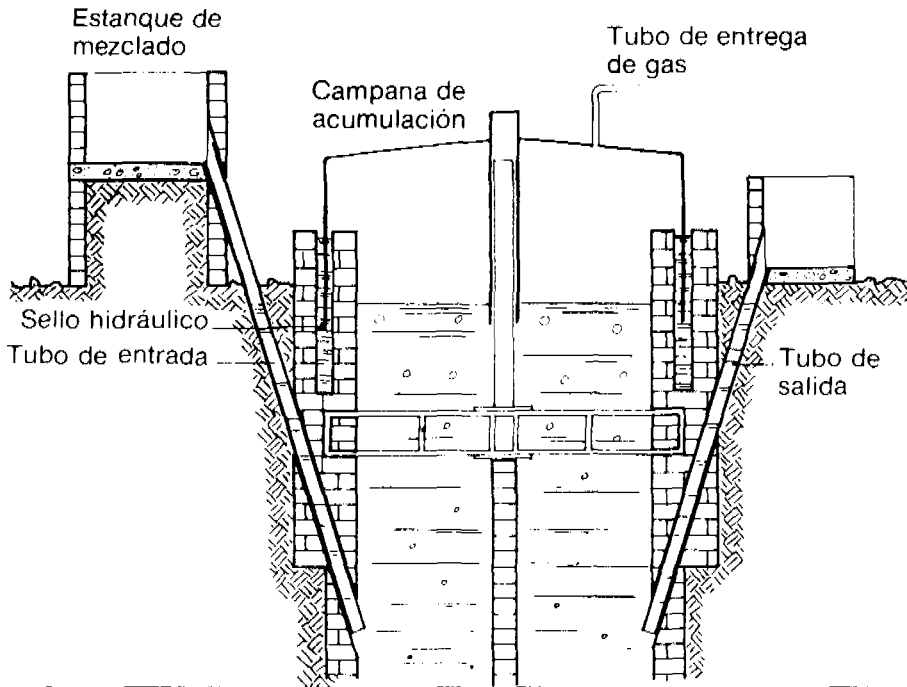


Figura 8.6: Digestor con campana flotante sellada con agua (Pyle, 1982).

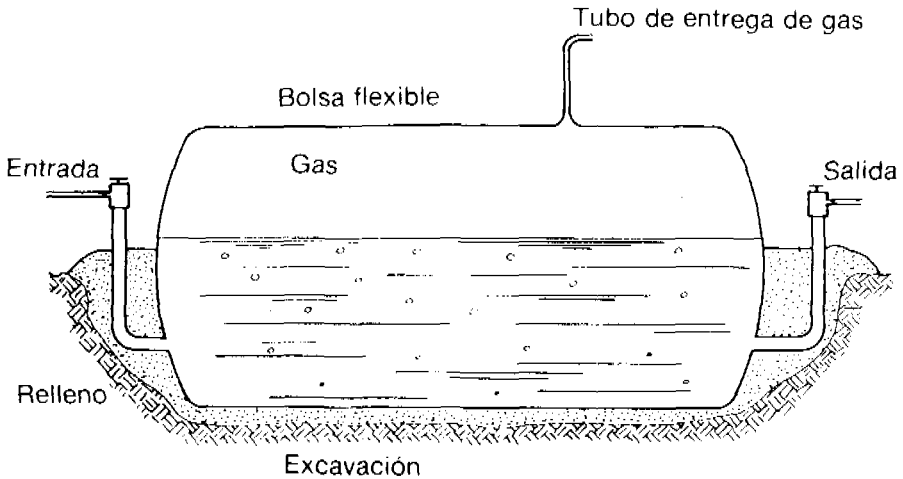


Figura 8.7: Digestor de bolsa flexible (Pyle, 1983).

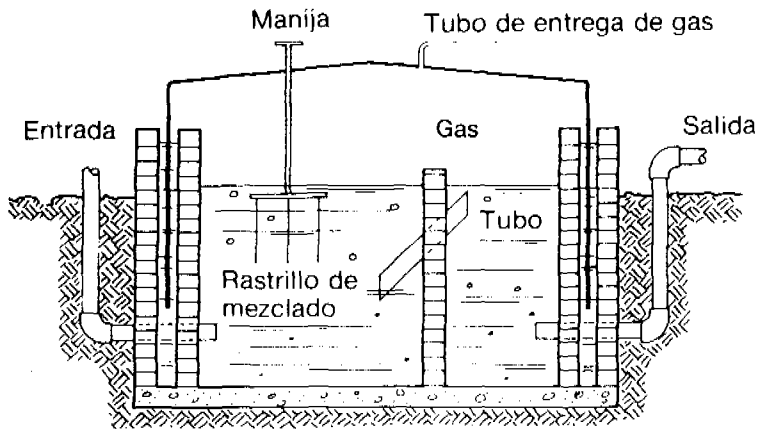


Figura 8.8: Digestor de dos cámaras con campana flotante, de las Filipinas (Arceo, 1983).

Tasas de producción de biogás

La tasa de producción de biogás depende del material de biomasa y el tipo de planta usados. La tabla 8.3 da una indicación aproximada de las tasas de producción para varios tipos de desechos animales. En términos generales, se puede estimar la tasa de producción de gas entre 10 y 30% del volumen del digestor por día, dependiendo del material de alimento, tipo de planta digestora, temperatura ambiente, y otras condiciones de operación.

Puede ser difícil mantener una producción de biogás suficiente para suministrar el combustible para el bombeo de agua en las estaciones más frescas. Si el digestor de biogás fuera diseñado para producir suficiente gas para reemplazar el

Tabla 8.3: Tasas de producción de biogás para varios tipos de alimento (Mazumdar, 1982).

Desecho animal	Cantidad disponible (kg/día)	Tasa de producción (m ³ /día)
1 búfalo	10-15	0.50-0.75
1 vaca cebú	8-10	0.25-0.40
1 ternero		0.15-0.25
1 cerdo	25	0.05-0.10
10 gallinas		0.02-0.04
1 oveja o cabra		0.02-0.04
1 usuario de letrina	1	0.02-0.03

requerimiento de combustible Diesel aun en la época fresca, el digestor tendría que ser muy grande y de esta forma los costos de construcción serían extremadamente altos. Será más económico diseñar la planta de producción de biogás para proveer la mayor parte de requerimiento de combustible, digamos 80%, en los meses más cálidos del año, pero menos, digamos 40% en los meses más frescos. Aunque se requiera más combustible Diesel, los ahorros en el costo de construcción en la planta de gas resultarán en menores costos totales.

8.3 MOTORES QUE USAN BIOGAS COMO COMBUSTIBLE

Los motores con ignición por chispa pueden funcionar con biogás solo. Los motores Diesel requieren algunas modificaciones para permitirles que funcionen principalmente con biogás suplementado con combustible Diesel. Esto es una operación de "combustible dual" con hasta el 60% del requerimiento de combustible Diesel reemplazado por biogás. La experiencia demuestra que no es práctico reemplazar una mayor proporción del requerimiento de Diesel, debido a las limitaciones operacionales de los motores Diesel. La temperatura de la cámara de combustión del motor es mayor (aproximadamente 700°C) al final de la carrera de compresión, pero esto es menor que la temperatura a la cual la mezcla biogás/aire hace ignición espontáneamente. De esta forma, siempre se requiere la inyección de un pequeño suplemento de combustible Diesel para asegurar la ignición fácil de la mezcla biogás/aire.

La mayoría de los motores Diesel pueden ser modificados para su operación con combustible dual. En muchos casos, el arreglo más sencillo es el de conectar el tubo del suministro de biogás directamente al tubo de admisión de aire del motor, después del filtro (Figura 8.9). Para asegurar una operación satisfactoria con combustible dual, el ácido sulfhídrico del biogás debe ser removido por purificación. La potencia pico de salida de un motor Diesel modificado que funciona con biogás es del 25 al 35% menor que cuando se usa combustible Diesel exclusivamente. En principio, los motores de gasolina también pueden funcionar con biogás, usando un poco de gasolina para arrancar. Se puede utilizar un carburador estándar para alimentar el biogás, pero los carburadores diseñados exclusivamente para gas generalmente darán mejores resultados (Figura 8.10).

8.4 GASIFICACION

En el proceso de gasificación, se calienta y gasifica biomasa seca para producir un gas combustible conocido como gas de producción. Los materiales de biomasa indicados para la gasificación son la madera, carbón de leña, carbón

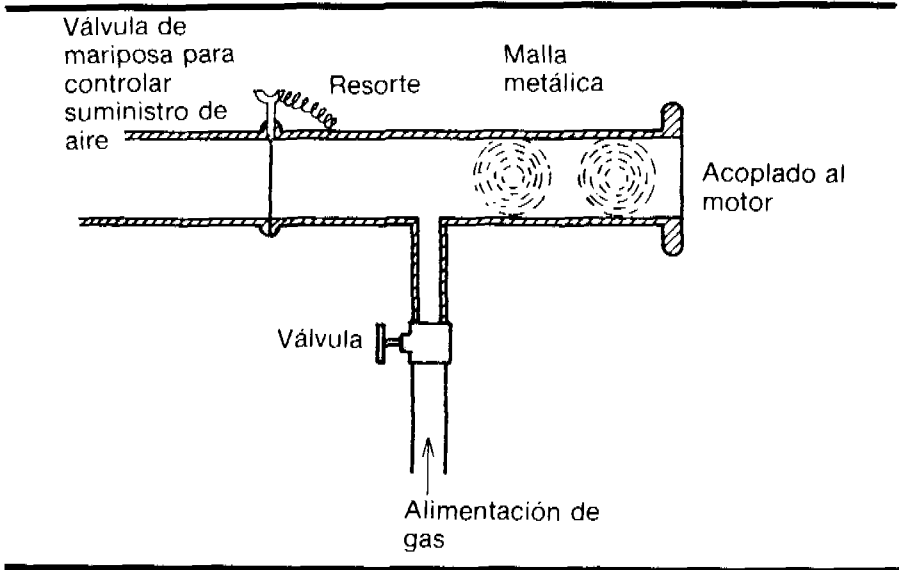


Figura 8.9: Modificación a motor Diesel para usar combustible dual (Kasturirangan, 1976).

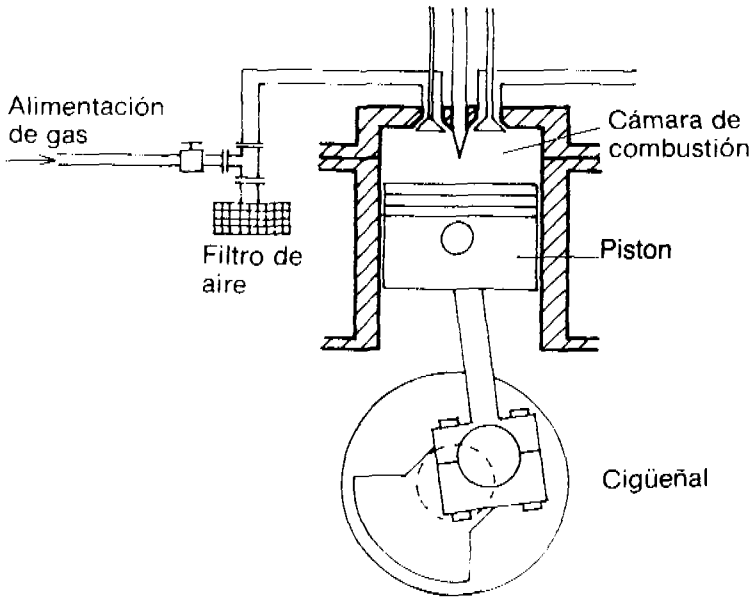


Figura 8.10: Carburador diseñado para motor de gasolina que funciona con biogás (Kasturirangan, 1976).

mineral, y otra variedad de materiales secos orgánicos, tales como trocitos de leña, aserrín, cáscaras de coco, tuzas de maíz, semillas de palmeras, y semillas de otras frutas. La gasificación es bastante diferente de la producción de biogás, porque la producción ocurre en un medio seco.

Generalmente, el gasificador es un tanque vertical, el cual se alimenta con la biomasa seca por encima (Figura 8.11). Se admite un flujo restringido de aire por la parte inferior de la unidad, apenas suficiente para que parte del material alimentado queme lentamente como en una estufa u horno. Es esencial que el suministro de aire sea restringido para que la carga completa no entre en combustión. Sólo una pequeña parte del material debe quemarse para producir el calor requerido para la gasificación del resto.

Se produce una mezcla de gases calientes, de la cual los componentes combustibles principales son hidrógeno y monóxido de carbono (aproximadamente 30-35% del volumen total de gas), el resto siendo principalmente nitrógeno. El poder calorífico del gas de producción es relativamente bajo, aproximadamente 3-5 MJ por m³ de gas.

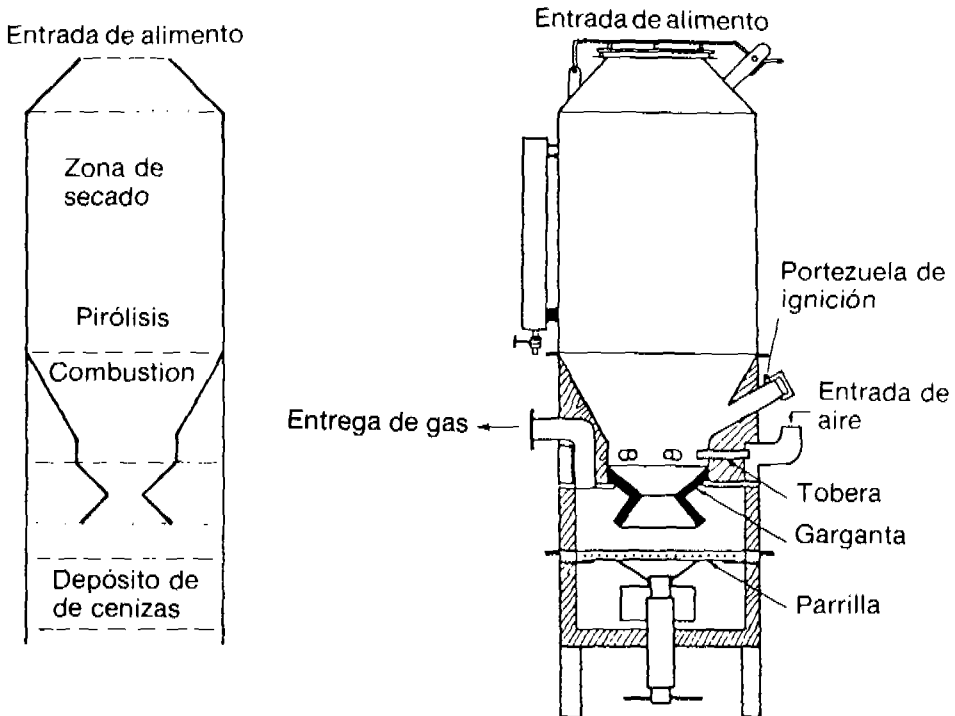


Figura 8.11: Diagrama esquemático de un gasificador (Jain, 1984)

Existen varios tipos de gasificadores, tales como el de lecho fijo, el de lecho fluidizado, y gasificadores de baño derretido, cada uno de los cuales produce gases de composición diferente. Los gasificadores de lecho fijo son los más comúnmente usados y trabajan mejor si el contenido de humedad del alimento es menor del 25%. Sin embargo, los gasificadores de contracorriente pueden usar efectivamente biomasa con un contenido de humedad de hasta 40-50%.

Dependiendo del diseño del gasificador, el tipo de material alimentado, y las condiciones de operación, el gas producido puede contener cantidades apreciables de alquitrán y hollín y puede ser tóxico debido a su alto contenido de monóxido de carbono.

Consecuentemente, puede ser necesario purificar el gas antes de su uso.

El material de alimentación para los gasificadores no debe tener un tamaño demasiado grande, porque la eficiencia del proceso de gasificación depende de la superficie de contacto entre el aire y el material de alimento. Se obtienen los mejores resultados con materiales de alimento que son altamente porosos, razonablemente húmedos, y de un bajo contenido de cenizas. Debido a las muchas variables involucradas, la operación de los gasificadores no es fácil de controlar y requiere destrezas considerables. La eficiencia de la gasificación generalmente es más alta para plantas grandes que para plantas pequeñas.

8.5 MOTORES QUE USAN GAS DE PRODUCCION COMO COMBUSTIBLE

La potencia de salida de un gasificador generalmente está dada como la máxima potencia al eje del motor que usa el gas de producción. Se consiguen gasificadores con potencia al eje pico de 7.5 kW y mayores. Los motores de ignición por chispa pueden funcionar con gas de producción solo, mientras que para los motores Diesel, el gas debe ser mezclado con un suplemento de combustible Diesel para asegurar su ignición rápida y su combustión. La mayoría de motores de gasolina pueden funcionar con gas de producción pero su eficiencia es baja. Los motores de gasolina modernos de alta velocidad no son particularmente recomendables para operar con gas de producción, porque tienen válvulas de entrada pequeñas, las cuales pueden ser fácilmente bloqueadas por las impurezas en el gas. La mezcla de gas de producción y aire también tiene una tasa de combustión mucho menor que la mezcla aire/gas/gasolina vaporizada, y la potencia de salida de un motor de gasolina que funciona con gas de producción es sólo un 50-60% de su potencia con gasolina.

8.6 PRODUCCION DE ETANOL

El etanol es producido por la conversión anaeróbica de azúcares por microorganismos, tales como levaduras, bacterias u hongos. Los azúcares están presentes en la biomasa en forma de carbohidratos, almidón, y también en el material celulósico. Los residuos de cultivos para azúcar, tales como caña de azúcar, yuca, remolacha de azúcar, y sorgo dulce, son más indicados para la producción de etanol que los residuos de granos. La tabla 8.4 da una indicación de la producción de etanol para varios tipos de fuentes de carbohidratos.

Tabla 8.4: Producción de etanol de varios tipos de fuentes de carbohidratos (Alam, 1982)

Fuente de Carbohidratos	Producción de etanol (1/ton)
Caña de azúcar	67
Yuca	180
Sorgo dulce	85

8.7 MOTORES QUE USAN ETANOL COMO COMBUSTIBLE

El etanol puede ser mezclado con gasolina y usado en motores con ignición por chispa que no necesitan modificaciones, siempre y cuando el contenido de etanol sea menor al 20%. Si se desea usar combustible con un mayor contenido de etanol, deben hacerse modificaciones al carburador, sistema de ignición, o cabeza del cilindro. Se han desarrollado motores especiales, los cuales pueden funcionar exclusivamente con etanol.

BIBLIOGRAFIA

- ALAM, W., and AMOS, J. M. (1982). The economies of scale of fuel-grade ethanol plants. *Energy*, 7, 6, 479-481.
- ARCEO, T. L. (1983) Biogas digesters in the Philippines. *NSTA Technology Journal*, 8, 4, 26-32.
- BARNETT, A., PYLE, L., and SUBRAMANIAN, S.K. (1978). Biogas technology of the third world (IDRC Document 352.1/78 B1). Ottawa, Canada, International Development Research Centre.
- BORDA (1982). Biogas: manual for the research of biogas programmes. Bremen, Federal Republic of Germany, Bremen Overseas Research and Development Association.
- DATTA, R., and DUTT, G. S. (1981). Producer gas engines in villages of developing countries. *Science*, 213, 731-736.
- ESCAP (1981). Renewable sources of energy, Vol. II: Biogas. Bangkok, Thailand, United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific.
- FOLEY, G., and BERNARD, G. W. (1983). Biomass gasification in developing countries (Technical Report No. 1). London, UK, Earthscan.
- GARY, H. P., PANDE, P. C., and THANUI, K. P. (1979). Designing a suitable biogas plant in India. *Appropriate Technology*, 7, 1, 29-31.
- HALL, D. O., BERNARD, G. W., and MOSS, P. A. (1982). Biomass energy for developing countries. Oxford, UK, Pergamon Press.
- JAIN, B. C. (1984). Gasifier systems for energy production from biomass and their economies. *Bio-energy News*, 2, 5/6, 33-41.
- KASTURIRANGAN, K. et al. (1976). Use of biogas in Diesel engines. in: Proceedings of 3rd national conference on internal combustion engines, University of Roorkee, India, 177-178.
- LOVE, P. (1981). Economics of alcohol fuel production and use. in: Proceedings of 2nd Canadian national alcohol for power conference. Winnipeg, Manitoba, Canada. Biomass Energy Institute.
- MATHUR, V. K. et al. (1983). Coal gasification using solar energy. *Solar Energy*, 30, 5, 433.
- MAZUMDAR, A. (1982). Biogas handbook. Bombay, India, Tata Energy Research Institute.

- MCGARRY, M. G., and STAINFORTH, J. (eds.) (1978). Compost, fertilizer and biogas production from human and farm wastes in the People's Republic of China (Publication TS 8e). Ottawa, Canada, International Development Research Centre.
- PARKER, H. W. (1981). Engine fuels from biomass. *Journal of Energy Resources Technology*, 193, 4, 344-351.
- PYLE, D. L. (1982). Anaerobic digester designs in the third world. in: *Proceedings of the international symposium on anaerobic digestion, held at Cardiff, Wales, UK, April 1981*. London, UK, Applied Science Publishers.
- PYLE, D. L. (1983). Anaerobic digester principles and design alternatives. in: *Report of training workshop on monitoring and evaluation of biogas systems, held at Lusaka, Zambia, September 1982 (Document CSC (83) AEP-14)*. London, UK, Commonwealth Science Council.
- ROLZ, C. (1981). Ethanol from sugar crops. *Journal of Enzyme and Microbial Technology*, 3, 1, 19-23.
- TAM, D. M., and THANH, N. C. (1983). Biogas technology in Asia: the perspectives. *Renewable Energy Review Journal*, 5, 1, 1-29.
- UNESCO (1982). *Review of literature on promotion of biogas systems*. Paris, France, United Nations Educational and Science Organization (UNESCO).
- UNITED NATIONS (1980). *Guidebook on biogas development (Energy Resources Development Series No. 21)*. New York, USA, United Nations.



APENDICE A

GLOSARIO DE TERMINOS

Abatimiento	La distancia que cae el nivel de agua en un pozo durante su bombeo.
Acoplamiento de potencia	El proceso de acoplar la salida de potencia de la fuente al requerimiento de potencia del subconjunto motor-bomba para que haya una transferencia óptima de potencia entre los dos.
Acuífero	Formación geológica que contiene agua.
Agua potable	Agua que es segura para su consumo por personas.
Agua subterránea	Sin mayor especificación: agua que ocupa todos los espacios libres en una formación geológica. En la práctica: el agua que se infiltra, atraviesa o es almacenada en cantidades apreciables en formaciones subterráneas.
Anemómetro	Equipo usado para medir la velocidad del viento.
Area barrida por el rotor	El área barrida por las aspas de un rotor eólico.
Arreglo fotovoltaico	Un conjunto de módulos fotovoltaicos montados sobre una armazón con el cableado necesario, capaz de producir potencia eléctrica.
Bomba centrífuga	Una bomba que usa el principio de fuerza centrífuga para alzar agua; la fuerza centrífuga es impartida al agua mediante un impulsor el cual rota dentro de una carcasa; un impulsor y su respectiva carcasa se llaman "etapa"; las bombas centrífugas que tienen más de un impulsor se llaman bombas centrífugas multi-etapas.

Bomba de Desplazamiento positivo	Tipo de bomba en el cual una cierta cantidad de agua es atrapada al comienzo de cada ciclo de bombeo; capaz de entregar esta cantidad de agua a una mayor elevación o contra una determinada presión; por ejemplo, un bomba reciprocante de pistón.
Bomba de pozo profundo	Bomba capaz de impulsar agua desde un pozo profundo; el término se aplica tanto a bombas manuales como a aquellas movidas por motor.
Bomba de turbina	Tipo de bomba que eleva agua por una acción mecánica similar al de la hélice de un avión.
Bomba sumergible	Un conjunto bomba/motor consistente en una bomba centrífuga acoplada directamente a un motor eléctrico; apropiada para trabajar sumergida bajo el agua.
Cabeza de bombeo	La diferencia total en cabeza entre el nivel de bombeo del agua y el nivel al cual es entregado en descarga libre; también llamada cabeza total.
Cabeza estática	La diferencia de altura para la cual debe elevarse el agua por un sistema de bombeo.
Caloría	Unidad de medición de energía en forma de calor; cantidad de calor requerida para aumentar la temperatura de un gramo de agua en un grado Celsius.
Carrera de bombeo	La distancia recorrida por el pistón de una bomba entre su punto máximo y mínimo.
Caudal	El volumen de líquido bombeado por unidad de tiempo; usualmente se expresa en metros cúbicos por segundo.
Celda solar	Dispositivo fotovoltaico (semiconductor) que puede convertir la radiación solar directamente en electricidad.
Coefficiente de potencia	Razón que representa la proporción de la potencia total disponible en el viento que es extraída por un rotor eólico; su valor máximo teórico es de $16/27$ (Abreviación, Cp).

Corriente alterna	Corriente eléctrica en la cual la dirección se invierte a intervalos frecuentes, 120 veces por segundo (60 ciclos por segundo), tal como se usa en la red eléctrica.
Corriente directa	Corriente eléctrica cuya dirección permanece constante.
Costo de oportunidad	La mejor alternativa de uso de un costo; el valor real del dinero pagado por un bien o servicio.
Costo equivalente anual	El costo de un sistema de bombeo expresado como el pago anual equivalente que debe hacerse durante toda su vida útil.
Costos de capital	Todos los costos asociados con la construcción o instalación de un sistema.
Costos recurrentes	Todos los costos asociados con operar y mantener un sistema de suministro o bombeo de agua.
Desarrollo de mano de obra	Acción planificada sistemáticamente para obtener un balance entre la mano de obra disponible y las necesidades de mano de obra, presentes y futuras, tanto en cantidad como en calidad.
Diseño estandar	Conjunto de planos, especificaciones, cantidad de materiales y descripción del método de construcción, el cual puede ser aplicado a gran escala y para un amplio rango de condiciones.
Eficiencia	<ul style="list-style-type: none"> — La eficiencia energética diaria (del subsistema) es la razón entre la energía hidráulica de salida y la energía eléctrica producida por el sistema de suministro de energía, para un día completo. — La eficiencia de potencia (del subsistema) es la razón de potencia hidráulica de salida a la potencia eléctrica suministrada en cualquier instante.
Energía cinética	La energía contenida en una masa en movimiento, en virtud de su movimiento.
Energía hidráulica	La energía efectivamente utilizada para elevar agua.

Excrementos	Productos de desecho sólidos y líquidos de humanos y animales (heces y orina).
Factor de empacamiento	La razón entre el área cubierta por celdas y el área total de un módulo fotovoltaico.
Factor de recuperación de capital	La proporción de una inversión de capital que debe de ser recuperada cada año para amortizar completamente la cantidad original en un número especificado de años a una tasa de descuento seleccionada.
Ferrocemento	Mezcla de arena y cemento reforzada por una malla metálica delgada o refuerzo similar; se usa como material de construcción para tanques de almacenamiento de agua, viviendas, embarcaciones, etc.
Fondo rotatorio	Fondo establecido con el depósito inicial de una suma fija, el cual recibe intereses periódicos sobre esta suma; los préstamos hechos de este fondo son destinados a un propósito específico (tal como mejoras en el sistema de suministro de agua); los pagos hechos por éstos préstamos se utilizan nuevamente para el mismo fin.
Hidrogeología	La rama de la ciencia que trata de la ocurrencia, distribución y movimiento del agua debajo de la superficie de la Tierra.
Inversor	Un dispositivo electrónico para convertir corriente directa en corriente alterna.
Irradiación solar	La energía recibida del Sol por unidad de área en un período de tiempo específico, usualmente tomado como un día expresado como kWh o MJ por m ² y por día.
Irradiancia global	La suma de la irradiancia directa y difusa incidente sobre una superficie horizontal a nivel del piso.
Irradiancia solar	La potencia radiante recibida del sol por unidad de área.

Joule (o Julio)	Medida de trabajo; un Joule es aproximadamente la cantidad de trabajo hecho cuando se eleva 0.1 kilogramo de agua una distancia vertical de un metro contra la fuerza de gravedad (al nivel del mar). (Abreviación, J).
Kilowatio-hora	Cantidad de energía; se consume un kilowatio-hora cuando una fuente de potencia de un kilowatio es utilizada durante el período de una hora (abreviación, kWh). Mantenimiento Actividades relacionadas con el uso y conservación de equipo, necesarios para su funcionamiento eficiente.
Mes de diseño	Para los propósitos de diseño de una bomba solar, eólica o hidráulica, es conveniente escoger un "mes crítico" (radiación solar mínima, viento mínimo, o caudal mínimo) para el cual la bomba debe poder suministrar el agua requerida; este mes se llama el mes de diseño.
Nivel de servicio	Grado de accesibilidad y conveniencia del suministro de agua, o del servicio de remoción de desechos y aguas servidas.
Nivel freático	El nivel debajo del cual todos los espacios libres de la roca o el suelo están llenos de agua.
Participación comunitaria	La participación activa de la comunidad en la planeación, operación y control de servicios y equipos.
pH	Parámetro que denota la acidez o alcalinidad del agua; los valores del pH van de 0 a 14; un valor de 7 indica la neutralidad, los valores por debajo de 7 denotan una acidez creciente, y los valores por encima de 7 indican una alcalinidad creciente.
Potencia	Capacidad de suministrar energía; mediada en Watt o wátios.
Producción	La tasa de flujo de agua de un pozo.
Radiación difusa	Radiación solar que es dispersada por la atmósfera.

Radiación directa	Radiación solar transmitida directamente a través de la atmósfera.
Radiación extraterrestre	La radiación solar recibida en el límite exterior de la atmósfera terrestre.
Rotor (de una bomba eólica)	El componente principal de una bomba eólica, que intercepta el viento y convierte la energía cinética presente en el viento a energía mecánica en la forma de potencia al eje.
Seguidor de punto máximo de potencia	Dispositivo electrónico de acoplamiento de impedancias que mantiene la salida de un arreglo fotovoltaico en su valor máximo.
Sistema de distribución	La tubería, válvulas, bombas y equipo adicional usado para llevar al agua desde su fuente, planta de tratamiento o suministro principal a los usuarios.
Sótano (geológico)	Interfase en el subsuelo debajo de la cual se halla únicamente roca sólida.
Subsistema	El componente bomba-motor de un sistema solar de bombeo; convierte la potencia eléctrica suministrada por el sistema de suministro de energía en una salida hidráulica útil.
Tasa de descuento	La tasa a la cual se descuenta el valor futuro del dinero para calcular su valor presente; usualmente se expresa como un porcentaje anual.
Torque	La fuerza que actúa para producir una rotación.
Valor presente	El valor de un costo o beneficio futuro expresado en dinero de hoy.
Velocidad de viento de entrada	La velocidad del viento a la cual el molino de viento empieza a producir una salida útil; no es lo mismo que la velocidad de arranque requerida para que una bomba eólica comience a operar.
Velocidad de viento de salida	La velocidad de viento para cual está diseñada la salida de operación de la bomba eólica, para prevenir su daño por vientos fuertes.

Voltaje de
circuito abierto

El voltaje de una celda, módulo o arreglo solar,
medido en sus terminales sin carga eléctrica.

Watio pico

Unidad de medida para la potencia de salida de un
módulo o arreglo fotovoltaico bajo condiciones de
referencia (Abreviación, Wp).

Watt (o Watio)

Unidad de medida de la tasa de efectuar trabajo en
general, y de potencia eléctrica específicamente. 1
kilowatt (kW) = 1000 watt. 1 Megawatt (MW) =
1000 kW.

APENDICE B

FABRICANTES Y PROVEEDORES

B.1 FABRICANTES Y PROVEEDORES DE SISTEMAS DE BOMBEO SOLARES

Esta lista no implica recomendación o respaldo de los productos de ninguno de los proveedores. No se intenta que sea una lista completa de proveedores de bombas solares.

Fabricante/ Proveedor	Dirección
AEG/Telefunken	Industriestrasse 29 D-2008 Wedel (Holstein) Federal Republic of Germany
Alsette SpA	Cadriano de Granarolo E. 40057 Bologna Italia
Ansaldo SpA	Via Nicola Lorenzi 8 16152 Genova Corningliano Italia
Arco Solar Inc.	P.O. Box 4400 Woodland Hills, California 91365 USA
BP Solar Systems Ltd.	Aylesbury Vale Industrial Park Farmborough Close Stocklake Aylesbury, Bucks. HP20 IDQ UK
Central Electronics Ltd.	4 Industrial Area Sahibabad, U.P. India 201 010
Chronar Trisolar	10 De Angelo Drive Bedford, Massachusetts 01730 USA
Dinh Company	Box 999 Alachua, Florida 32615 USA

Duba S/A	Nieuwstraat 31 B-9200 Wetteren Bélgica
Ebara Corporation	Asahi Building 6-7 Ginza, 6-Chome Chuo-Ku, Tokyo 104 Japón
GPL Industries	Box 306 (Grundfos) La Canada, California 91011 USA
Grundfos	Poul Jensens Vej Bjerringbro 8850 Dinamarca
Heliodinamica	Caixa Postal 8085 01051 Sao Paulo, S.P. Brasil
IDE Industries	Zone Industrielle B-5430 Rochefort Belgium
Komatsu Electronic	2612 Shinomiya Metals Company Hiratsuka Kanagawa 254 Japón
KSB A/GP.O.	Box 360 6650 Homburg Federal Republic of Germany
Kyocera Corporation	5-22 Kitainoue-Cho Higashino Yamashina-Ku Kyoto 605 Japón
Wm. Lamb Company Inc.	P.O. Box 4185 North Hollywood, California 91607 USA
Lowara SpA	36075, Montecchio Maggiore Vicenza Italia

B.2 FABRICANTES Y PROVEEDORES DE BOMBAS EOLICAS

Una extensa lista de fabricantes/ proveedores de bombas eólicas y generadores eléctricos eólicos, con detalles del equipo que se ofrece, está disponible en el "Catalogue of Wind Machines" (Catálogo de Máquinas Eólicas), preparado por Consultancy Services Wind Energy Developing Countries (CWD) y Twente Working Group on Development Techniques (WOT), Publicación CWD 83-1, Marzo 1983. Copias del "Catálogo de Máquinas Eólicas" pueden obtenerse de:

Consultancy Services Wind Energy
Developing Countries
P.O. Box 85
3800 AB Amersfoort
Holanda

Otra lista útil de fabricantes/ proveedores de bombas eólicas, con detalles sobre los equipos ofrecidos, está incluida en la publicación "Le Point Sur Les Eoliennes de Pompage", preparado por Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques (GRET), publicación "Le Point Sur", No. 1, Enero de 1984. Se pueden obtener copias de esta publicación en la siguiente dirección:

Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques
30, rue de Charonne
75011 París
Francia

B.3 FABRICANTES Y PROVEEDORES DE BOMBAS MOVIDAS POR POTENCIA HIDRAULICA

A. Bombas de ariete hidráulico

Fabricante	Nombre del ariete hidráulico
Ab Bruzaholms Bruk	BZH Hydrauliska 570 34 Bruzaholm Sweden
Berry Hill Ltd.	Davey Hydram 75, Burwell Road St. Thomas, Ontario N5P 3R5 Canada
Briau S.A.	Briau Hydram B.P. 43 370009 Tours France

CeCoCo	CeCoCo Hydro-Lift Pump P.O. Box 8 Ibaraka City, Osaka 567 Japan
Centro Las Gaviotas	Alta Cabeza "Gaviotas" Paseo Bolivar no. 20-90 Bogota Colombia
C.W. Pipe Inc.	Fleming Pump P.O. Box 678 Amherst, Virginia 24521 USA
Godbole & Sons	Auto-lift Pump New Ramdaspath Kachipura Nagpur-1 India
Green & Carter Ltd.	Vulcan Hydram Grange Farm, Northington Airesford, Hants. SO 24 9 TG UK
Industrias Mecanicas Rochfer Ltda.	Bomba Hydraulicas Rochfer Avenida Jose de Silva 3765 Jardin Moria Rosa Caixa Postal 194 Sao Paulo, CEP 14400 Brazil
Jandu Plumbers Ltd.	Jandu's Hydram P.O. Box 409 Uhuru Road Arusha Tanzania
John Blake Ltd.	Blake Hydram P.O. Box 43 Accrington, Lancashire BB5 5LP UK
John Danks & Son. Pty Ltd.	Billabong Doody Street, Alexandria Sydney, New South Wales Australia

Pfister & Langhanns	SANO Ram Pump Sandstrasse 2-8 Postfach 3555 8500 Nürnberg 1 Federal Republic of Germany
Pilter	Pompe Pilter 22, Rue FlorianPompe Alto 75020 Paris France
Premier Irrigation Equipment Ltd.	Premier Hydram 17/1C Alipore Road Calcutta 700.027 India
Rife Hydraulic Engine Manufacturing Co.	Rife Ram Pump 316 W. Poplar Street P.O. Box 790 Norristown, PA 19401 USA
Schlumpf AG	Schlumpf Pump CH-6312 Steinhausen Kanton Zug Switzerland
Singh Metal Casting Works	Chandra Hydram 110-D Nirala Nagar Lucknow India
WAMA Maschinenbau	Wama Pump Bergstrasse 8 8018 Grafing bei München Federal Republic of Germany

B. Bombas de Turbina

Existe un número considerable de fabricantes de bombas de turbina en la República Popular China. Algunos están preparados para suministrar cotizaciones para exportación:

Fujian Provincial Agricultural Machinery
Import & Export Corporation
24 Dongda Road
Fuzhou, Fujian Province
People's Republic of China

C. Bombas de corriente de río

Ndume Agricultural
Turbo pump
Machinery Manufacturers Ltd.
P.O. Box 62
Gilgil
Kenya

APENDICE C

FUENTES DE INFORMACION SOBRE FUENTES RENOVABLES DE ENERGIA Y SU APLICACION A SISTEMAS DE SUMINISTRO DE AGUA A PEQUEÑA ESCALA

C.1 Organizaciones Nacionales

Alemania	German Solar Energy Industrial Association (Federal Republic) Kruppstrasse 5 D-4300 Essen
Argelia	Organisme National de la Recherche Scientifique Station de l'Energie Solaire Route de l'Observatoire Bouzareah Alger
Argentina	Centro de Estudios Fotointeticos y Bioquimicos Fundacion Miquel Lillo Universidad Nacional de Rosario Suipacha 531 2000 Rosario Grupo de Energie Solar Universidad Nacional 4400 Salta, Buenos Aires
Australia	Appropriate Technology Development Group 20 Holdsworth Street Woolahara, NSW 2025 Australian Wind Energy Association P.O. Box 1965 Canberra City, ACT 2601 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization P.O. Box 225 Dickenson, ACT 2602
Bélgica	Appropriate Technology for Developing Countries Blyde Inkomststraat 9 B-3000 Leuven

- Collectif d'Echanges pour la Technologie Approprieé
18 rue de la Sablonniere
B-1000 Brussels
- Bolivia** Instituto de Energia
Academy of Sciences
Casilla 5279
La Paz
- Botswana** Botswana Technology Centre
Private Bag 0092
Gaborone
- Rural Industries Innovation Centre
P.O. Box 138
Kanye
- Brasil** Laboratory of Solar Energy
University Campus
Paraiba Federal University
Joao Pessoa
58000 Paraiba
- Technology Center of Minas Gerais
Avenida Jose Candido da Silveira 2000
P.O. Box 2306
Belo Horizonte, Minas Gerais
- Burkina Faso** Centre Interfricain d'Etudes Hydrauliques
B.P. 369
Ouagadougou
- Burundi** Groupe de Recherches d'Utilisation des
Energies Alternatives
Université de Burundi
Faculté des Sciences
B.P. 2700
Bujombara
- Camerún** Unité de Recherches Energetique de l'Onarest
B.P. 4110
Yaoundé
- Canadá** Brace Research Institute
McDonalds College of McGill University
P.O. Box 900
Ste. Anna de Bellevue, Quebec H9X 1C0

- International Development Research Centre
P.O. Box 8500
Ottawa K1G 3H9
- Chile Solar Energy Program
Institute of Technological Research
P.O. Box 667
Santiago
- China Beiyng Institute of New Technology Applications
(People's Republic) Shi Zhi Men
Beiyng
- Guangzhou Institute of Energy
Conversion Technology
Chinese Academy of Science
81 Martyrs' Road
C.P.O. Box 1254
Guangzhou
- Zhejiang Research Institute for Biogas and Solar Energy
Hangchow, Zhejiang
- Colombia *INDERENA*
Instituto para el Desarrollo de los Recursos Naturales Renovables
Carrera 14, No. 25 A-66
Bogota, D.E.
- Centro Las Gaviotas
Apartado Aereo 18261
Bogota, D.E.
- Costa Rica Renewable Energy Resources Programme
Centro Agronomico Tropical de Investigacion
Apartado 74
Turrialba
- Instituto Tecnologico de Costa Rica
Centro de Informacion Technologica
Apartado 159
Cartago
- Ecuador Instituto Nacional de Energia
Stam Prisca 233
Quito

- Egipto**
- Solar Energy Laboratory
National Research Centre
El Tahrir St.
Dokki, Cairo
- University of Alexandria
Faculty of Engineering
Solar Application Laboratory
El-Hadara, Alexandria
- Etiopia**
- Ethiopian National Energy Commission
P.O. Box 486
Addis Ababa
- National Water Resources Commission
P.O. Bóx 1008
Addis Ababa
- Filipinas**
- Centre for Non-Conventional Energy Development
PNPC Complex
Merritt Road, Fort Bonifacio
Metro Manila
- National Institute of Science and Technology
625, Pedro Gill Street, Ermita
Metro Manila
- Francia**
- Agence Française pour la Maitrise de l'Energie
Immeuble "Le Bearn"
27 rue Louis Vicat
75015 Paris
- Groupement pour l'Exploitation
Rationnelle de l'Energie Solaire
Université de Provence
Centre de Saint Jérôme
13397 Marseille
- Groupe de Recherches et d'Echanges
Technologiques
30, rue de Charonne
75011 Paris
- Institut Technologique Dello
Le Moulin Rouge
60410 Verberie

- Gabon
 Ministère de l'Énergie et des Ressources
 Hydrauliques
 B.P. 874
 Libreville
- Bremen Overseas Research and Development Association
 Bahnhofplatz 13
 2800 Bremen
- German Appropriate Technology Exchange
 Postfach 5180
 D-6236 Eschborn
- Ghana
 Council for Scientific and Industrial Research
 P.O. Box 74
 Kade
- Technology Consultancy Centre
 University of Science and Technology
 Kumasi
- Grecia
 National Council for Energy Research
 P.O. Box 5568
 Athens
- Guatemala
 Central American Research Institute for
 Industry
 P.O. Box 1552
 Guatemala City
- Holanda
 Centre for International Cooperation and
 Appropriate Technology
 Delft University of Technology
 P.O. Box 2350
 Delft
- Consulting Services Wind Energy Developing
 Countries
 P.O. Box 85
 3800 AB Amersfoort
- TOOL Foundation
 Mauritskade 61
 1092 AD Amsterdam

- Honduras Rural Technology Programme
Apartado Postal 703
Tegucigalpa, D.C.
- India Birla Institute of Technology and Science
Pilani, Gobar Research Station
Ajitmal, Etawah, U.P.
- Central Power Research Institute
P.O. Box 1242
Bangalore, Karnataka 560012
- Centre for Rural Development and Appropriate Technology
Haus Khnas
New Delhi 110016
- Khadi and Village Industries Commission
Gobar Research and Development Centre
Kora Gramadyog, Kendra
Bombay 400 092
- Indian Institute of Technology
Powai, Bombay 400 076
- National Aeronautical Laboratory
Wind Power Division
P.O. Box 1779
Bangalore 560 017
- Tata Energy Research Institute
Bombay House
24 Homi Mody Street
Bombay 400 023
- Indonesia Dian Desa
Jl. Kali Urang Km 7
P.O. Box 19
Bulaksumur
- Institute of Technology Bandung
Development Technology Centre
Jl. Ganesha No. 10
P.O. Box 276
Bandung
- Solar Energy Research Centre
Gajah Mada University
Sekip Unit III
Yogyakarta

- Islas Fiji Institute of Natural Resources
University of the South Pacific
P.O. Box 1168
Suva
- Israel Applied Research Institute
Ben Gurion University
P.O. Box 11025
Beersheva 814120
- Scientific Research Foundation
P.O. Box 8745
Jerusalem 991036
- Italia Fiat-Energy Sector
Renewable Energy Systems
Via Cuneo 20
10152 Turino
- International School on Solar Energy and other Renewable
Energy Resources
P.O. Box 65
61029 Urbino
- Japón Government Industrial Research Institute
Solar Research Laboratory
1, Hirate-Machi, Kita-Ku
Nagoya 1462
- Jordania Royal Scientific Society
P.O. Box 4014
Amman
- Korea Appropriate Technology Centre
(Republic of)Umwol-ri, Hongdong-myum
Hongseong-gun
Chungnam 350-11
- Rural Energy Resources Division
Office of Rural Development
Institute of Agricultural Sciences
Suweon
- Kuwait Kuwait Institute for Scientific Research
P.O. Box 24885
Safat, Kuwait City

Libia	Centre for Solar Energy Studies P.O. Box 8004 Tripoli
Madagascar	Polytechnic Institute University of Madagascar B.P. 1500 Antananarivo
Mali	Centre de Recherches Solaires B.P. 134 Bamako
Mexico	Mexican Institute of Renewable Resources Avenida Dr. Vertiz 724 Mexico City
Nepal	Research Centre for Applied Science and Technology Tribhuvan University Kirtipur, Katmandu
Nigeria	ONERSOL l'Office de l'Energie Solaire B.P. 621 Niamey
Nueva Zelanda	Centre for Scientific and Industrial Research Charles Ferguson Building Bowen Street Wellington
Pakistán	Appropriate Technology Development Organization 1-B Street 47th, F-7/1 Islamabad
	Pakistan Council for Scientific and Industrial Research Press Centre, 2nd Floor Shahra-e-Kamal Ataturk P.O. Box 672 Karachi 0109
Papua Nueva Guinea	Papua New Guinea University of Technology P.O. Box 793 Lae
	South Pacific Appropriate Technology Foundation P.O. Box 6937 Boroko

Reino Unido	Intermediate Technology Development Group Myson House Railway Terrace Rugby CV21 3HT
Rwanda	Université Nationale de Rwanda Centre d'Etudes et d'Applications de l'Energie B.P. 117 Butare
Senegal	Centre d'Etudes et de Réalisation pour les Energies Renouvelables B.P. 476 Dakar Société Industrielle des Applications de l'Energie Solaire B.P. 1277 Dakar
Sierra Leona	Advisory Unit for Technology Research and Development Faculty of Engineering University of Sierra Leone Mount Aureol, Freetown
Sri Lanka	Water Resources Board Wind Energy Unit 2A Gregory's Avenue Colombo 7
Sudán	National Council for Research Institute of Energy Research P.O. Box 2404 Khartoum
Suecia	Swedish National Board for Energy Source Development P.O. Box 1103 S-16312 Spanga Swedish Agency for Research Cooperation with Developing Countries (SAREC) Birger Jarlsgatan 61 S-10525 Stockholm
Suiza	SKAT Swiss Centre for Appropriate Technology Varnbuelstrasse 14 CH-9000 St Gallen

- Surinam** University of Suriname
 Department of Engineering
 University Complex, Building II
 Leyweg
 Paramaribo
- Thailandia** Asian Institute of Technology
 Renewable Energy Resources Information Centre P.O. Box
 2754
 Bangkok
- Khon Kaen University
 Faculty of Engineering
 Solar Energy Group
 Khon Kaen
- King Mongkut's Institute of Technology
 Thonburi Campus
 Bangkok 14
- National Energy Administration
 Energy Research Section
 Wind Energy Unit
 Pibultham Villa
 Kasatsuk Bridge
 Bangkok 5
- Tanzania** Arusha Appropriate Technology Centre
 P.O. Box 764
 Arusha
- Togo** Solar Energy Department
 School of Sciences
 University of Benin
 B.P. 1515
 Lome
- Tunesia** Association pour le Developpement et
 l'Animation Rurale
 10 rue Eve Nohelle
 Tunis
- Turquia** Turkish Solar Energy Institute
 P.O. Box 37
 Bakanliklar, Ankara

Power Machinery Department
Faculty of Agriculture
University of Ankara
Cengiz Sotah No. 119/3
Yenimahalle, Ankara

IT Power Ltd.
Mortimer Hill
Mortimer, Reading, Berks. RG7 3PG

National Centre for Appropriate Technology
Llyngwern Quarry
Machynlleth
Powys, Wales

University of Reading
Energy Group
Whiteknights
Reading, Berks. RG6 1A7

Estados Unidos de
América

Wind Energy Association
America1609 Connecticut Avenue
Mount Rainier, Maryland 20822

IT Power Inc.
1015, 18th Street, N.W.
Suite 801
Washington, D.C. 20036

National Academy of Sciences
Board on Science and Technology for
International Development
2101 Constitution Avenue
Washington D.C. 20418

National Center for Appropriate Technology
P.O. Box 3838
Butte, Montana 59702

New Alchemy Institute
237 Hatchville Road
East Falmouth, Massachusetts 02536

Peace Corps
906 Connecticut Avenue, N.W.
Washington D.C. 20525

Sandia National Laboratories
Division 621
P.O. Box 5800
Albuquerque, New Mexico 87185

Volunteers in Technical Assistance
P.O. Box 12438
Arlington, Virginia 22209

Zambia Technology Development and Advisory Unit
University of Zambia
P.O. Box 32379
Lusaka
Zambia

D.2 ORGANIZACIONES INTERNACIONALES

FAO Food and Agricultural Organization of the
United Nations
Via delle Terme di Caracalla
00100 Rome
Italy

IRC International Reference Centre for
Community Water Supply and Sanitation
P.O. Box 93190
2509 AD The Hague
The Netherlands

UNESCO United Nations Education and Science Organization
UNESCO Network on Renewable Energy Sources
7 Place de Fontenoy
75007 Paris
France

UNICEF United Nations Children's Fund
Water and Environmental Sanitation
Advisory Team
866 U.N. Plaza
New York, N.Y. 10017
USA

UNIDO United Nations Industrial Development Organization
P.O. Box 2300
A-1180 Vienna
Austria

- UNCNRET United Nations Centre for Natural
Resources, Energy and Transport
1 U.N. Plaza
New York, N.Y. 10017
USA
- UN/ESCAP United Nations Economic and Social
Commission for Asia and the Pacific
Sala Santitham
Rajdamnern Avenue
Bangkok 2
Thailand
- UN/ECAF United Nations Economic and Social
Commission for Africa
Africa Hall
P.O. Box 3005
Ethiopia
- UN/CEPAL Comisión Económica y Social
para América Latina y el Caribe
Edificio Naciones Unidas
Avenida Dag Hammarskjöld
Casilla 179
Santiago
Chile

Publicaciones del IRC

La Serie Documentos Técnicos publicada por IRC provee información sobre temas seleccionados en suministros de agua y saneamiento ambiental para países en desarrollo. Siempre que sea posible en estas publicaciones se desarrolla un enfoque integral incorporando aspectos técnicos, económicos, sociales y organizativos para atacar los problemas urgentes de esta área.

Otros títulos IRC en Español:

SDT-11 Filtración lenta en arena para abastecimiento público de agua en países en desarrollo.

SDT-12 Participación y educación en programas de suministros comunitario de agua potable y de saneamiento.

SDT-13/14 Abastecimiento de agua mediante fuentes públicas.

SDT-15 Evaluación como herramienta para el planeamiento de abastecimiento de agua en comunidades rurales.

SDT-17 Participación comunitaria en abastecimiento de agua y saneamiento.

SDT-18 Sistema de abastecimiento de agua para pequeñas comunidades.

SDT-19 Guía sobre aspectos sanitarios de la plomería.

Los documentos arriba mencionados, pueden ser obtenidos en: CEPIS, Casilla 4337, Lima, Perú