

CAPITULO 14

BOMBEO DE AGUA

SOLAR

IMPORTANCIA DE ESTA APLICACION Estudios recientes, llevados a cabo por las Naciones Unidas, estiman en 90.000 millones de dólares el monto de la inversión necesaria para resolver el problema del agua potable en el mundo. La parte más desalentadora de este informe puntualiza que aunque se dispusiera de este capital, los recursos hidráulicos del planeta, a partir de la década del 90, están en franca disminución. Si a ello se agrega la alta tasa de crecimiento para la población mundial, el problema toma un cariz alarmante. Esta breve introducción puntualiza la importancia que puede tener el bombeo solar en locaciones que carecen totalmente de sistemas eléctricos.

CAPACIDAD DE BOMBEO Los sistemas manuales de bombeo sólo pueden proporcionar reducidos volúmenes en pozos medianamente profundos (Fig.14.5). Cuando se desea aumentar el caudal y la calidad del agua potable de un pozo en existencia, es muy común que su profundidad deba ser incrementada. En zonas semi-desérticas la napa de agua es siempre profunda. En ambos casos la extracción del agua requiere el uso de motores, sean éstos de combustión interna o eléctricos. En estos casos el bombeo de agua solar, utilizando un sistema FV, ofrece una solución económica, dada su simplicidad de instalación y su larga vida, la que está determinada en la práctica por la calidad de la bomba. Este tipo de bombeo puede resolver el problema de suministro de agua potable en comunidades con poblaciones entre 100 y 1.000 habitantes, con requerimientos moderados de irrigación. Aún en países desarrollados, el bombeo solar resulta ser una solución económica en establecimientos ganaderos situados en lugares semidesérticos o remotos. En algunas de estas locaciones los vientos cesan por completo durante el verano, paralizando la fuente tradicional de bombeo: el molido a viento.

BOMBEO SOLAR El principio fundamental del bombeo solar es bombear un caudal instantáneo relativamente bajo, ininterrumpidamente, por el mayor número de horas diarias que la locación permita. Este método contrasta con el tradicional, donde las bombas son accionadas por motores de alta potencia, los que bombean agua por un corto período de tiempo.

RENTABILIDAD DEL SISTEMA Para determinar la rentabilidad de un sistema solar de bombeo de agua se necesita contemplar el costo total del sistema (costo inicial más costo de mantenimiento). Si bien el costo inicial suele ser elevado, el uso de bombas de calidad reduce substancialmente el costo operacional, lo que permite recuperar la inversión inicial en un corto período de uso. Estudios publicados por el Sandia National Lab.en los EEUU, muestran que el costo por watt instalado decrece cuando la capacidad del sistema se incrementa.

CAPITULO 14- BOMBEO DE AGUA SOLAR

RENTABILIDAD La reducción más drástica se obtiene en sistemas con una capacidad eléctrica instalada entre 100 y 700W. Cuando se comparan los costos operacionales de un molino a viento o el de una bomba operada por un motor de combustión interna (diesel o gasolina), el bombeo solar resulta competitivo. Debe recordarse que la escasez de personal idóneo de servicio en el área, o la lejanía de los centros proveedores de repuestos, son factores que incrementan el costo de mantenimiento. Cuando se usan motores de combustión interna no es desusual que los costos asociados con el transporte, almacenamiento y distribución del combustible dupliquen su valor inicial durante la vida útil del sistema. Todas estas variables deben ser consideradas cuando se analiza la rentabilidad del sistema a instalarse.

REGIMEN DIURNO El régimen de uso más aceptado para un sistema de bombeo solar es el diurno. Esto hace posible la eliminación del banco de baterías, lo que simplifica su instalación y mantenimiento, aumentando su movilidad y vida útil. La necesidad de incrementar al máximo las horas de operación del sistema se traduce en la incorporación de un adaptador de impedancias, el que facilita el arranque matinal del motor. El uso de un seguidor automático dependerá del valor del incremento porcentual que éste provea para la latitud del lugar.

OBSERVACION Deberá tenerse presente que, en última instancia, *el caudal diario que puede bombearse nunca puede sobrepasar los recursos hidráulicos disponibles*. En todos los pozos el bombeo causa un incremento efectivo de su profundidad (profundidad dinámica). Este cambio puede ser de varios metros. Cuando los recursos hidráulicos son marginales, se corre el riesgo de dejar a la bomba fuera del agua. Para evitar esta situación, se debe reducir el caudal instantáneo a extraerse y, de ser posible, aumentar la duración del período de bombeo.

REGIMEN NOCTURNO Si el nuevo caudal diario es insuficiente, se puede incorporar un banco de baterías, lo que permite el bombeo nocturno. Esta adición obliga a expandir la capacidad de generación y a incorporar un banco de baterías, lo que aumenta el costo del sistema.

RESERVA Debe tenerse presente que la solución más simple y económica *es acumular agua en lugar de energía eléctrica*, usando una cisterna. Su incorporación permitirá minimizar el efecto causado por las variaciones estacionales de los recursos hidráulicos o desperfectos temporarios que interrumpen su funcionamiento.

ENERGIA Y POTENCIA DE BOMBEO El proceso de bombeo implica elevar un determinado volumen de agua desde un nivel por debajo de la superficie hasta la boca del pozo. Este procedimiento, hecho a mano o con la ayuda de animales, permitió por centurias la extracción de agua de un pozo. La *energía* mecánica necesaria para levantar un determinado volumen de agua entre estos dos niveles está dada por el producto de la fuerza aplicada para elevarlo por la distancia que recorre el balde colector. El caudal instantáneo de agua extraído (litros/minuto) está dado por la relación entre el número de litros recogidos y el tiempo de extracción. Si se desea incrementar el caudal, se necesita acelerar el proceso. La energía mecánica no cambia pero la *potencia* requerida (energía/unidad de tiempo) deberá ser incrementada. Si bien el análisis fué hecho en términos mecánicos, es fácil comprender que si la energía a proveerse es la eléctrica, el problema físico sigue siendo el mismo.

AGREGANDO UNA CISTERNA	Como se expresó con anterioridad, resulta conveniente usar un tanque de acumulación. Si se lo eleva por encima del nivel de la boca de salida del pozo se consigue presurizar la línea de salida. Si existe un desnivel natural en el terreno, ubicando el tanque de reserva en esta zona permitirá eliminar el soporte de sostén, abaratándose el costo de la instalación. La altura de la cisterna incrementa la distancia a la que debe ser elevada el agua, lo que requiere una mayor energía eléctrica. Si se mantiene el valor del caudal instantáneo, la potencia que deberá proporcionar el sistema FV deberá incrementarse.
PERDIDAS EN EL SISTEMA	La fricción del agua en la cañería introduce pérdidas mecánicas, las que deben ser compensadas por el sistema FV (aumento de la potencia a generarse). A estas pérdidas deberán agregársele las eléctricas, debido a la disipación de calor en los cables que alimentan la bomba, el rendimiento del motor eléctrico, o las pérdidas introducidas por el el adaptador de impedancias o el inversor, si la bomba es de CA.
TIPOS DE BOMBAS	Existen tres criterios de clasificación para las bombas de extracción. El primero toma en consideración la manera en que el agua es movida entre los dos niveles. Usando este criterio, se tienen las bombas centrífugas y las volumétricas (o de desplazamiento efectivo). El segundo criterio, la ubicación de la bomba respecto a la fuente de agua, clasifica las bombas como de superficie o de inmersión. Por último, si el criterio de selección está basado en el tipo de motor eléctrico requerido, se tienen las bombas de CC y las de CA. En la práctica un modelo en particular queda definido por una combinación de los tres criterios.
BOMBAS CENTRIFUGAS	La bomba centrífuga más común tiene paletas acopladas a un mecanismo rotativo de alta velocidad el que, básicamente, “tira” el agua hacia arriba. Algunos modelos incorporan, dentro del cuerpo de la bomba, hasta tres etapas de bombeo centrífugo, las que trabajan una a continuación de la otra. Las bombas a chorro son consideradas como centrífugas. En estas bombas un mecanismo rotativo crea un fuerte chorro, el que empuja, dentro de la bomba, el agua a extraerse. Es típico que por cada unidad de volumen inyectada se extraigan dos, lo que representa un balance neto de una unidad. Las bombas centrífugas pueden ser sumergibles o de superficie y resultan útiles cuando se requieren <i>abundantes caudales</i> de agua en pozos <i>de poca profundidad</i> . Cuando la fuente hidráulica es de superficie (lagunas, ríos o cisternas) este tipo de bomba representa la mejor solución. El uso más común para este tipo de bombas es la irrigación de sembrados. La Figura 14.1 muestra una bomba centrífuga de superficie con auto-cebado.
BOMBAS VOLUMETRICAS	Las bombas volumétricas usan un desplazamiento gradual, tomando un determinado volumen de agua dentro de un compartimento cerrado, el que es empujado hacia arriba por el volumen que le sucede. Cuando el agua llega a la boca del pozo, el volumen que empuja la bomba iguala al que emerge del pozo. A partir de este instante, la fuerza de impulsión no varía, permitiendo el bombeo de <i>caudales moderados en pozos de gran profundidad</i> . Estas bombas pueden ser sumergibles o de superficie. Las bombas a pistón, los burros de bombeo (<i>jack pumps</i>), las bombas a diafragma o a tornillo, representan diferentes versiones de este tipo de desplazamiento. Estas bombas pueden trabajar a profundidades entre 10 y 500 m. Las Figuras 14.2 (a, b y c) muestran tres modelos de este tipo.

DIFERENTES
MODELOS DE
BOMBAS

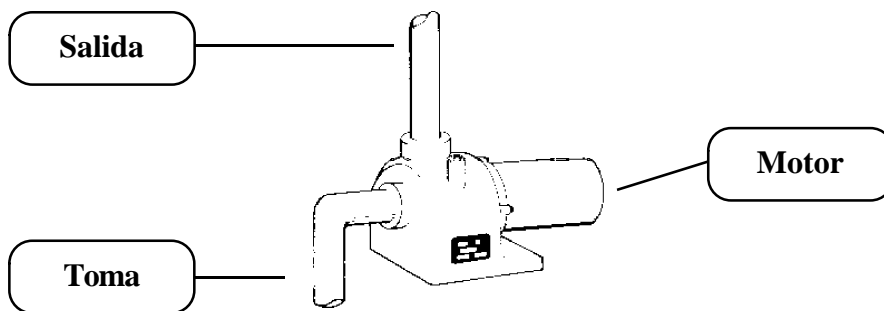


Fig. 14.1- Bomba Centrífuga de Superficie
(Cortesía de Sandia Laboratories)

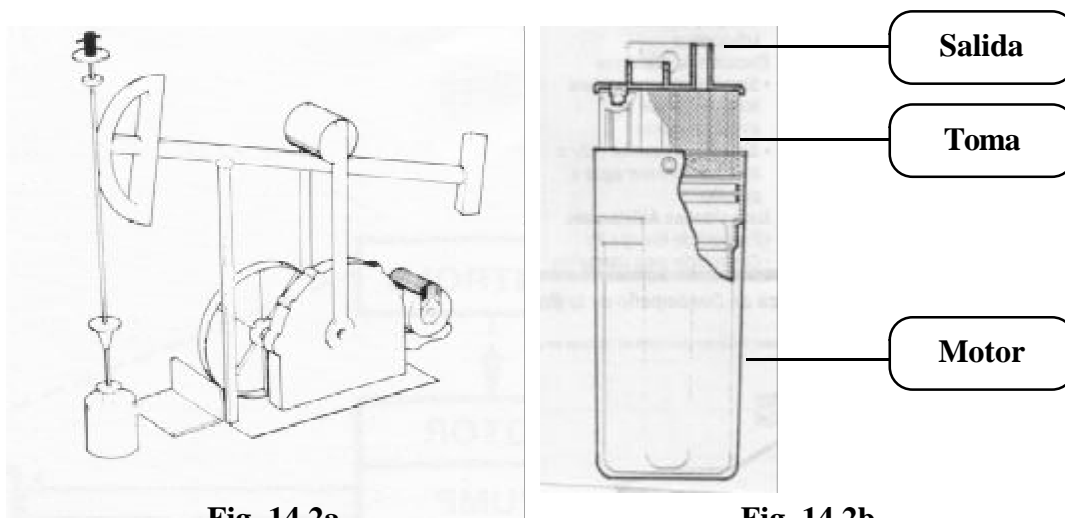


Fig. 14.2a
Burro de Bombeo
(Cortesía de Sandia Laboratories)

Fig. 14.2b
Bomba Sumergible a Diafragma
(Cortesía de Dankoff Solar)

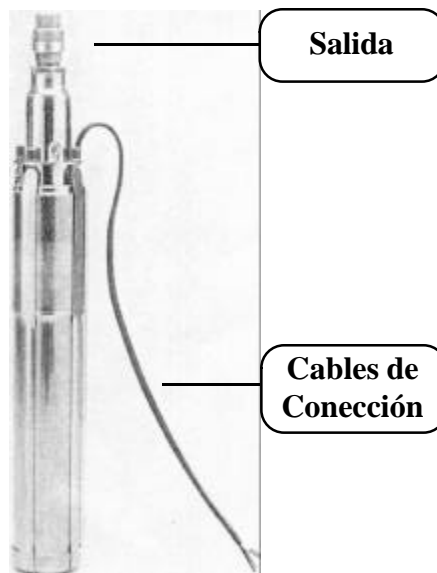


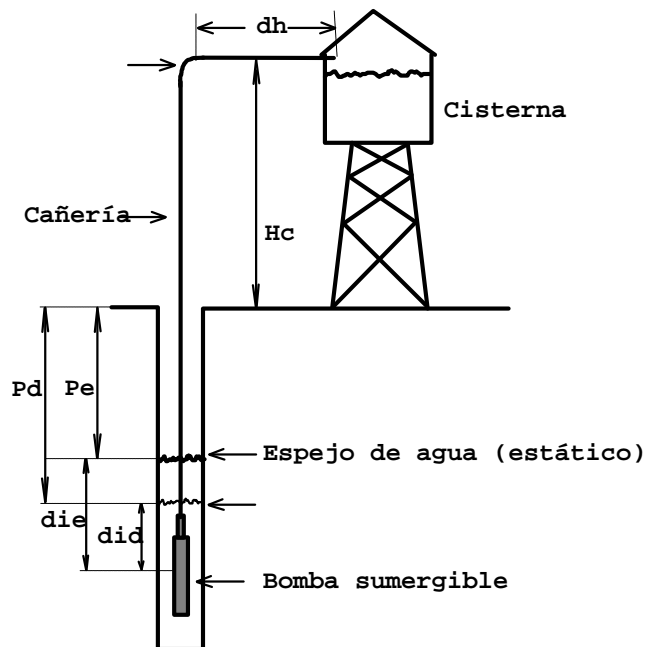
Fig. 14.2c
Bomba Sumergible a Diafragma
(Cortesía de Dankoff Solar)

MOTORES PARA BOMBAS

Los motores de CC que se utilizan en las bombas tienen, en general, carbones. Este tipo de motor suele requerir mayor atención debido al desgaste de los mismos, los que deben ser cambiados periódicamente. Para la bomba ilustrada en la Figura 14.2c el fabricante indica que los carbones necesitan ser cambiados con intervalos que varían entre 5 y 10 años. El rotor puede tener un bobinado o un magneto permanente. El valor de la resistencia eléctrica es menor para este último tipo, aumentando la eficiencia de la unidad. Para potencias de menos de 3HP (2.250W) puede usarse un motor de CC con rotor magnético. Entre 3 y 10 HP (2.250 a 7.500W) se prefiere el uso de un motor de CC con bobinado en el rotor. Los motores de CC sin carbones son, en realidad, motores de CA, ya que se necesita crear un campo magnético rotativo, lo que se consigue convirtiendo el voltaje de CC en uno trifásico de CA. Los motores de CA son los más indicados cuando la potencia requerida es elevada (más de 10 HP), ya que un motor de CC necesitaría un nivel de corriente demasiado elevado. Los modelos que usan motores de CA deben incorporar un inversor, el que aumenta las pérdidas eléctricas, disminuyendo la eficiencia del sistema. La ausencia de carbones reduce substancialmente el mantenimiento de estas unidades, pero disminuye sensiblemente la eficiencia del sistema, requiriendo más paneles FVs.

SISTEMA DE BOMBEO: TERMINOLOGIA

Para familiarizarnos con los términos asociados con esta aplicación, usaremos la Figura 14.3, la que ilustra un sistema de bombeo con bomba de inmersión volumétrica y tanque de acumulación.



Hc: Altura de la cisterna

Fig.14.3- Definición de términos

CAPITULO 14- BOMBEO DE AGUA SOLAR

ALTURA ESTÁTICA (He) El nivel del agua en el pozo tiene un valor estático (sin bombeo) y otro dinámico, cuando comienza la extracción. Al nivel estático se lo llama espejo de agua (*water table level*, en inglés). Al nivel mínimo alcanzado por el espejo de agua durante el proceso de bombeo se lo conoce como nivel de succión dinámico (*drawdown level*, en inglés). La distancia de inmersión (d_i) representa la diferencia entre el nivel de succión y la entrada a la bomba. Es común considerar la mitad del largo de la bomba como el nivel de entrada. Este valor varía entre un valor estático d_{ie} y otro dinámico d_{id} , ya que el nivel de succión no es constante. A la distancia entre el nivel de entrada a la bomba y el nivel de desagote en la cisterna la llamaremos altura estática del pozo o H_e (*static head*, en inglés). Este valor representa la máxima distancia a la que deberá ser elevada el agua del pozo, y está dado por:

$$H_e = d_{ie} + P_e + H_c \quad (1)$$

NOTA La altura de la cisterna (H_c) debe ser medida desde la boca del pozo al nivel de vaciado, y no el del agua en la cisterna, ya que este último es siempre menor.

ALTURA DINÁMICA (Hd) Cuando se inicia el proceso de bombeo, la altura dinámica del pozo debe tomar en consideración los nuevos niveles de succión, así como las pérdidas por fricción dentro de la cañería. La altura dinámica (H_d) está dada por la expresión:

$$H_d = P_d - d_{id} + H_c + h_{eqt} \quad (2)$$

Este es el valor que debe ser usado al elegir el tipo de bomba a usarse. El valor de d_{id} aparece con signo negativo porque la columna de agua por encima del punto de toma ayuda al proceso de bombeo. Este valor representa una pequeña corrección en relación al valor que alcanza la suma de P_d más H_c , y suele ser despreciado en la mayoría de las aplicaciones.

ALTURAS EQUIVALENTES Las pérdidas mecánicas de la cañería son reducidas a un valor de altura equivalente (h_{eq}), lo que permite reducir todos los valores en la expresión (2) a una sola unidad: la de longitud, facilitando los cálculos. Existen dos tipos de pérdidas: las introducidas por la fricción del agua moviéndose dentro de la cañería, y las introducidas por las turbulencias creadas por el uso de codos y uniones. **La suma de estos valores de pérdidas representa el valor de h_{eq} a considerarse en el diseño.** El valor de la pérdida por fricción está dado para una determinada longitud de cañería. Las tablas de origen estadounidenses proporcionan este valor “en pies de altura equivalente por cada 100 pies de longitud”. Las tablas métricas dan este valor en “metros de altura equivalente por cada 100m”.

OBSERVACION Puede observarse que tanto el numerador como el denominador usan la misma unidad (pie/pie; m/m). Consecuentemente, el valor tabulado no tiene unidad. Como en cada caso la altura equivalente está dada para cien unidades (100ft ó 100m), el valor de la tabla resulta ser un valor porcentual. Las tablas publicadas al final de este capítulo son de origen norteamericano. Estos valores porcentuales sólo pueden ser aplicados a longitudes dadas (o convertidas) en pies.

MATERIALES Y ALTURAS EQUIVALENTES El material usado en la fabricación de la cañería ofrece distintos grados de fricción. La Tabla II proporciona valores porcentuales para caños de acero, cobre y plástico (PVC o polietileno), con diferentes diámetros. Los valores en negrilla representan, para cada caso, el máximo valor práctico de pérdidas, y es aconsejable no excederlos. En la práctica, al seleccionar un tipo de bomba, el diámetro y el material de la cañería a usarse están determinados por el fabricante. En bombas pequeñas y medianas se usan cañerías de plástico flexible, las que tienen un bajo coeficiente de rozamiento (mínima altura equivalente). La cañería de polietileno tienen un uso extensivo debido a su bajo costo, su flexibilidad, su resistencia a la luz solar, congelamiento y su bajo peso por unidad de longitud.

ALTURA EQUIVALENTE DE CAÑERÍA El valor de $h_{eqcañ}$ de una instalación está dado por el producto:

$$h_{eqcañ} = L_{cañ} \times h\% \quad (3)$$

donde $h\%$ es el valor porcentual de la altura equivalente y $L_{cañ}$ es el valor de la longitud total de la cañería. En la Fig. 14.1 este valor está dado por :

$$L_{cañ} = Pd + Hc + d_h \quad (4)$$

donde d_h es el valor del largo de la cañería horizontal.

ALTURA EQUIVALENTE: CONECCIONES El valor para la altura equivalente que representa las pérdidas mecánicas introducidas por los codos, válvulas y otras conexiones usados en la instalación está dado como un valor de “longitud adicional” de la cañería sin conexión alguna. La Tabla I dá algunos valores ilustrativos. Por ejemplo, un codo de 90° de plástico (PVC) de ½” de diámetro añade 1,5 pies (ft) de longitud por cada 100ft de cañería derecha (1,5%).

NOTAS SOBRE LOS VALORES DE LA TABLA II Los valores porcentuales de la Tabla II pueden ser utilizados para calcular la pérdida de presión (por cada 100ft) para una cañería y caudal predeterminado. En el sistema norteamericano esta conversión se lleva a cabo dividiendo el valor porcentual obtenido en la tabla por 2,31 (un factor de conversión). Por ejemplo, si usamos un caño de polietileno de 1,25” de diámetro, de 100’ de largo, por el que circulan 10G/m, el porcentaje de pérdida es 1,66%. La pérdida de presión será de:

$$1,66 / 2,31 = 0,72 \text{ psi /100ft} \quad (6)$$

Como 14,70 psi equivalen a 1 atmósfera, podemos obtener la pérdida de presión en unidades métricas, para los 100ft de longitud (30,48m). Otra manera de interpretar este resultado es que se necesita una presión mínima de 0,72psi para hacer circular 10G/m en un caño de polietileno de 1,25” de diámetro, con una longitud de 100ft.

CONOCIMIENTO DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS Vimos que el valor de la profundidad dinámica depende del caudal hidráulico disponible, el que varía anualmente (verano/invierno) así como estacionalmente (períodos de sequías o lluviosos). Cuando se va a perforar un pozo por primera vez, el conocimiento de la fuente hidráulica comienza con referencias obtenidas para pozos activos en zonas adyacentes.

CAPITULO 14- BOMBEO DE AGUA SOLAR

CONOCIMIENTO DE LOS RECURSOS HIDRAULICOS El conocimiento íntimo del recurso hidráulico disponible requiere un largo período de uso. Por ello es conveniente observar su comportamiento, comenzando el bombeo con un caudal diario mínimo, el que puede ser incrementado al máximo previsto para el sistema. Esta forma de operación permitirá optimizar la distancia de inmersión dinámica. Este valor es crítico, ya que debe evitarse que la bomba quede por encima del nivel de succión, pero suficientemente alejada del fondo del pozo, para evitar que los depósitos arenosos obturen su entrada.

PRESION DE SALIDA El grado de presurización deseado para la cañería de salida depende del uso que se le dará al agua acumulada en el tanque. La relación entre la altura de una columna de agua y el valor de presión está dada (unidades americanas) por:

$$\text{psi (libras por pulgada cuadrada)} = \text{Altura (en pies)} / 2,31 \quad (7)$$

Si la línea de salida sólo alimentará los bebederos para ganado, la altura puede reducirse substancialmente, ya que el diámetro de la cañería puede ser incrementado para compensar por la longitud. Si el agua va a ser empleada para uso doméstico, la cañería tiene un diámetro mucho menor (alrededor de 1/2 pulgada), lo que implica mayores pérdidas de presión. El tipo de casa habitación (planta baja o dos pisos), el valor de presión mínima requerido por alguno de los aparatos domésticos (lavaropas o lavaplatos) u otros usos (mangueras de regado manual) determinará en cada caso el valor mínimo de presión requerido. En la práctica el mínimo será cercano a los 40psi (2,72 atm.). Este valor requeriría un tanque ubicado a unos 93' de altura (28,4m). Esta solución no es económica, ya que aumentaría excesivamente la altura equivalente del sistema.

BOMBA DE PRESURIZACION (Booster Pump) En estos casos es conveniente usar una bomba adicional de presurización, la que automáticamente es activada cuando la presión de línea cae por debajo del valor mínimo seleccionado. Esta adición dicta la incorporación de un banco de baterías, ya que la presurización se requiere durante todo el día. Dependiendo de la distancia entre el pozo y la casa, puede que sea más conveniente implementar un sistema FV dedicado a la bomba de presurización. La Figura 14.4 muestra una de estas bombas.

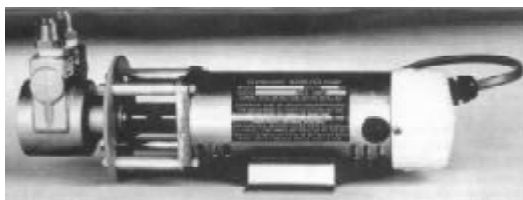


Fig. 14.4- Bomba de Presurización
(Cortesía de Dankoff Solar)

NOTA Estas bombas suelen ser utilizadas con un tanque de presurización en serie, el que absorbe las variaciones bruscas de presión cuando se usa el agua.

**CURVAS
CAUDAL /
PROFUNDIDAD**

La Figura 14.5 ilustra el comportamiento de las bombas en función de las dos variables del sistema: la altura dinámica y el caudal requerido. La escala para la altura dinámica es logarítmica, para poder mostrar con mayor detalle los volúmenes menores (bomba de mano). La escala horizontal (lineal) está dada en m³/día (1m³=1.000 lts). Puede observarse que, *independientemente del tipo de bomba*, al aumentar la profundidad del pozo el caudal disminuye (ver Nota). El área con doble rayado indica que dos tipos de bombas pueden proveer la solución.

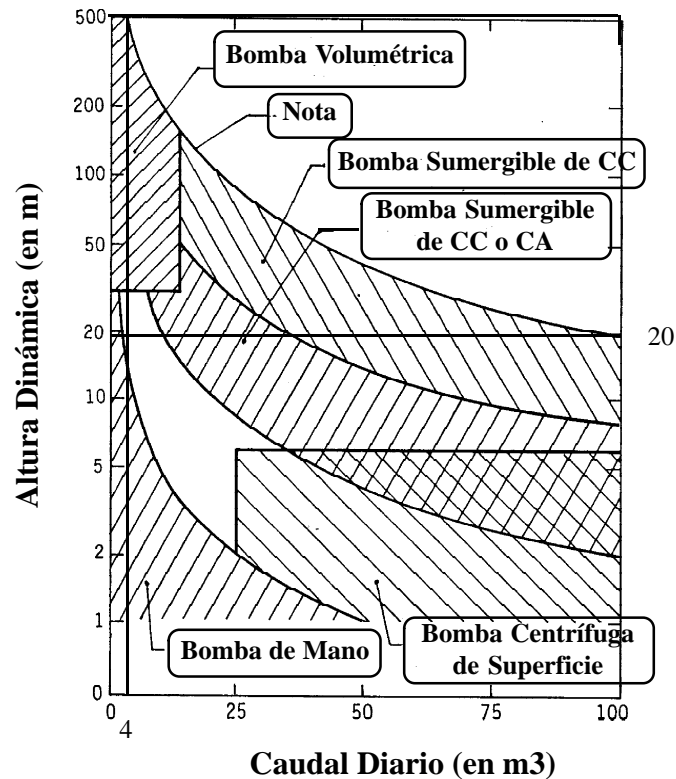


Fig. 14.5- Relación entre el Caudal Diario y el Tipo de Bomba
(Cortesía de Sandia Laboratories)

Nota: La curva que marca el límite máximo representa un valor constante, el que, en cada punto, está dado por el producto: Caudal Diario (m³) x Altura Dinámica (m) = 2.000 m⁴ (4 x 500 = 100 x 20 = etc, etc).

La Figura 14.6 muestra un diagrama proporcionado por uno de los fabricantes para ilustrar el comportamiento de varios de sus modelos. Puede observarse que es similar al anterior, con las coordenadas “x” e “y” intercambiadas. Ambas escalas son lineales.

COMENTARIOS Las estimaciones dadas por el fabricante respecto al caudal *diario* que puede ser bombeado asumen una duración específica para el día solar promedio, y recursos hidráulicos suficientes. Como el valor de insolación asumido por el fabricante puede diferir respecto al de la locación donde se instalará el sistema, es mejor usar el valor dado para el *caudal instantáneo* (lts/minuto o galones/minuto). Este valor asume que el sistema FV es capaz de suministrar la potencia requerida por el motor eléctrico, requisito que se cumple durante la duración del día solar promedio.

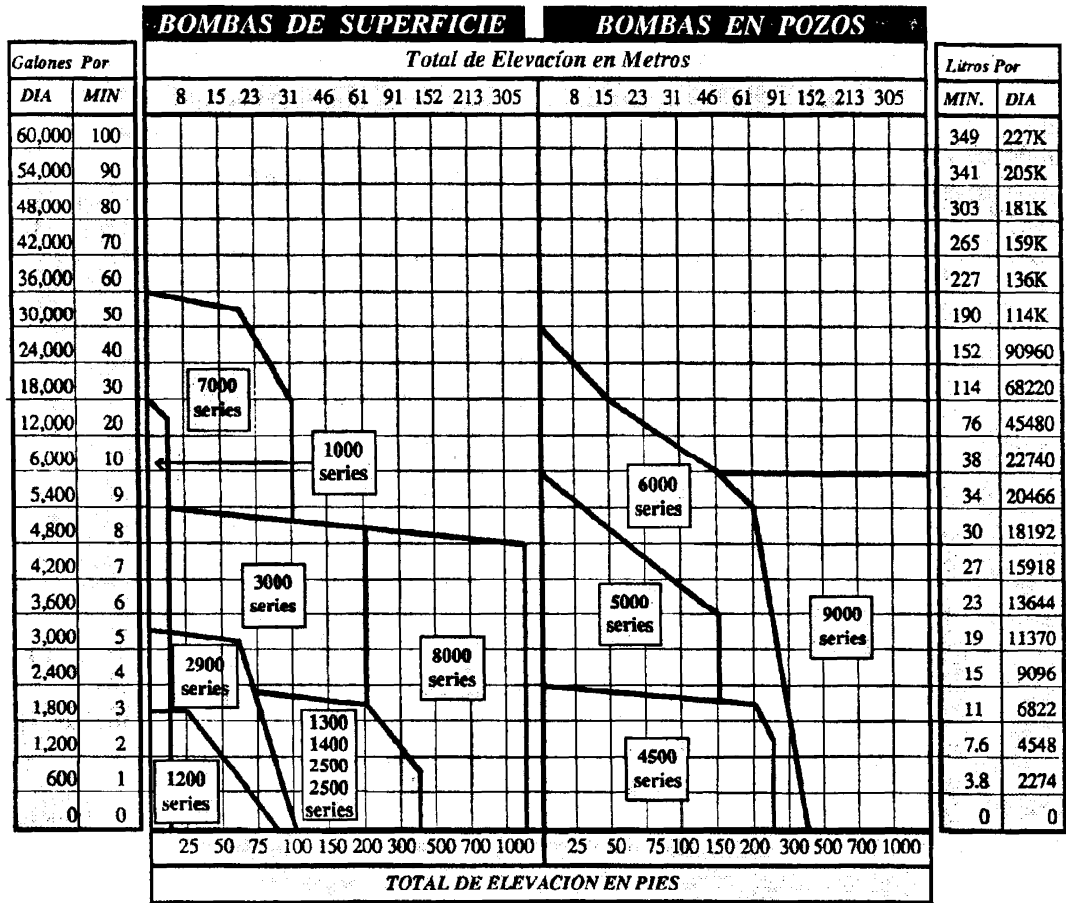


Fig. 14.6- Comportamiento de Diferentes Modelos de Bombas
(Cortesía de Dankoff Solar Pumps)

COMENTARIOS En la práctica el caudal diario estará dado por el producto del número de horas del día solar promedio del lugar, por el valor del caudal instantáneo dado por el fabricante. El número de paneles que éste considera necesarios para alimentar el sistema debe ser tomado como una indicación solamente. Es mejor calcular el sistema FV como se indicó en los capítulos precedentes, teniendo en consideración la degradación de la potencia de salida al aumentar la temperatura de trabajo. Dependiendo del tipo de bomba, si la instalación se lleva a cabo en un lugar ubicado a una considerable altura sobre el nivel del mar, puede necesitarse una corrección para el volumen del caudal. Consulte con el fabricante.

DISEÑO El proceso de diseño de un sistema de bombeo solar comprende los siguientes pasos:
1- Determinación del caudal diario.
 Este valor depende del uso que se le dará al agua bombeada y debe tener en cuenta la “peor condición” estacional que se anticipe (verano). Es por ello que al valor del caudal diario derivado del uso de la tabla de consumos típicos se le adiciona un margen de seguridad, usualmente entre un 15 y un 20% del valor obtenido anteriormente. Este nuevo valor representa el caudal diario deseado.

DISEÑO

Para obtener el caudal diario a bombearse debemos sumar un caudal “extra” que nos permita establecer (o restablecer) el caudal de reserva. Este valor representa el máximo caudal diario a bombearse.

CONSUMOS TIPICOS DE AGUA

Consumo humano: 400 lts diarios por persona¹

Explotación Ganadera (Cantidad por animal)²

Bovinos: 45 lts/día	Cabras: 8 lts/día	Burros: 23 lts/día
Ovejas: 8 lts/día	Caballos: 50 lts/día	Vacas lecheras: 57 lts/día
Pollos: 0,23 lts/día	Cerdos: 20 lts/día	Novillos: 20 lts/día

Irrigación

Por árbol frutal:	150 lts ²
Granja suburbana:	60 m ³ por hectaria

1- Un consumo humano de 400 lts/día representa un valor mínimo. Si se considera usos auxiliares (baños, lavado de ropa, regado de un jardín, etc) este valor debe ser triplicado.

2- Estos valores pueden variar substancialmente, dependiendo de la temperatura ambiente.

2- Determinación del volumen de reserva

La existencia de una reserva compensará por los días sin sol o los días durante los cuales el sistema debe ser reparado. El volumen de reserva toma un valor que es equivalente a unos 3 a 10 días de consumo.

3- Determinación de la altura dinámica equivalente.

La determinación de la longitud de la cañería es el primer paso. Sin embargo, el tipo de material, su diámetro, y otros detalles de instalación no serán conocidos hasta que elijamos la bomba a usarse. Al desarrollar nuestro ejemplo *asumiremos* un valor porcentual de pérdida para poder determinar el modelo de bomba a usarse. A posteriori, haremos una revisión para verificar el valor real de la altura dinámica, y ver si los resultados son satisfactorios. Dependiendo del valor de la profundidad máxima del pozo, la estimación para las pérdidas mecánicas representará un incremento en la altura dinámica de un 2 a un 4% de la longitud de cañería.

4- Selección del tipo de bomba a usarse.

Cuando se conocen el caudal diario, la altura dinámica, y el promedio de la duración del día solar, puede calcularse el caudal instantáneo (lts/min), lo que nos permitirá elegir el modelo de bomba.

5- Diseño de la fuente de generación FV.

Una vez que la bomba ha sido seleccionada, se conocerá el valor de potencia que ésta requiere para extraer el caudal diario. Las pérdidas mecánicas ya han sido consideradas. Debemos agregar las pérdidas eléctricas (eficiencia del motor, adaptador de impedancias y pérdidas por disipación en los cables de alimentación). Con este paso se obtendrá el valor real de la potencia a generarse. A partir de este punto el proceso de cálculo es igual al descrito en los capítulos precedentes. La incorporación de un seguidor automático, a fin de alargar el día solar, dependerá de la latitud del lugar (porcentaje de incremento del día solar).

**EJEMPLO
DE
DISEÑO**

Nuestro ejemplo consiste en el diseño de un sistema de bombeo para ganado. La cantidad de animales es reducida (40), pero el propósito es ilustrar el método de diseño. Veintiseis (26) vacas lecheras, (6) toros, dos (2) caballos y tres (6) novillos forman el plantel.

Determinación del caudal diario

Usando la tabla de consumos promedios, tendremos que:

2 caballos	=	2 x 50 l/d =	100 l/d
6 toros	=	6 x 45 l/d =	270 l/d
26 vacas lecheras	=	26 x 57 l/d =	1.482 l/d
6 novillos	=	6 x 10 l/d =	60 l/d
Caudal mín. diario:.....			1.912 l/d

Caudal deseable. El margen de seguridad será del 20%. El caudal diario deseable será de 2.294,4 l/d.

Nivel de reserva. Acumularemos 9.177,6 lts (9,178m³) lo que representan cuatro días de reserva.

Caudal extra. Para no introducir grandes variaciones entre el valor diario deseable y el máximo, el caudal extra será un 10% del nivel deseable (229,44lt/d).

Esta consideración abarata el costo de la bomba. Puede observarse que con este caudal los 9.177,6 lts se acumularán en un plazo de 40 días. En la práctica sólo ocasionalmente se usará toda la reserva durante los períodos de inactividad.

Caudal diario: 2.523,84 lt/d (2,52 m³/d).

Longitud de cañería

El espejo de agua está a 40m de profundidad, pero se desconocen las características dinámicas del pozo. Para compensar esta falta de conocimiento, basado en la información de otros pozos cercanos, estimaremos un cambio dinámico de +10% (4m). Como debemos mantener la bomba sumergida en todo momento, agregaremos 1m más de profundidad. Conocemos aproximadamente donde se ubicará el tanque de reserva respecto a la salida del pozo, de manera que podemos estimar la distancia horizontal de la cañería que lo alimentará. Este valor es de 2m en nuestro ejemplo. Nos falta determinar la longitud de la cañería que alimentará a la cisterna.

Cañería de alimentación a la cisterna

Asumiendo un tanque redondo, su volumen está dado por:

$$V = \pi \times r^2 \times H = \pi \times D^2/4 \times H = 0,785 \times D^2 \times H \qquad 8$$

donde D es el diámetro de la base, 0,785 x D² es el valor de su superficie, y H es la altura del tanque. Nuestra reserva representa 9,178 m³. Si el diámetro de nuestro tanque es de 2m, la superficie de la base tendrá 3,14 m², y su altura 2,92m. En la práctica los bebederos tienen cierta elevación sobre el suelo, de manera que asumiremos que la base estará ubicada 1m por sobre el nivel del suelo. La altura de la salida que alimenta al tanque deberá superar el nivel del agua (1 + 2,92) en unos 0,5m. La cañería de alimentación tendrá una longitud de 4,42m.

El largo total está dado por:

EJEMPLO DE DISEÑO

Profundidad dinámica del pozo (40 + 4 + 1) = 45,00 m
 Longitud horizontal = 2,00 m
 Altura cañería a la cisterna (2,92 + 1 + 0,5) = 4,42 m
 Long. de cañería = 51,42 m

Altura dinámica

Asumiremos que las pérdidas mecánicas adicionan un 2% del largo de cañería (1,03m). La altura dinámica a considerarse será entonces de 52,45 m (172 ft).

Volumen instantáneo (lt/min)

En el lugar donde se instalará el sistema el día solar promedio es de 5hr (300 min). El caudal instantáneo máximo será de 8,41 l/min (2.523,84/300). Para ilustrar mejor el problema, asumiremos el uso de la bomba ilustrada en la Fig. 14.2c. Las especificaciones para tres modelos son ilustradas en la Figura 14.6.

Vertical Lift		Model 5218			Model 5226			Model 5230		
Feet	Meters	LPM	GPM	Watts	LPM	GPM	Watts	LPM	GPM	Watts
0	0	10.5	2.8	78	14.2	3.7	96	27.5	7.3	204
25	8	10.1	2.7	84	13.7	3.6	108	25.0	6.6	212
50	15	9.6	2.5	96	12.9	3.4	124	23.3	6.2	220
75	23	9.0	2.4	108	12.4	3.3	138	21.0	5.5	229
100	30	8.9	2.1	114	12.0	3.2	151	18.8	5.0	240
125	38	8.3	2.2	126	11.6	3.1	166	16.8	4.4	250
150	46	7.7	2.0	138	11.0	2.9	180	15.5	4.1	259
175	53	7.3	1.9	144	10.7	2.8	192	14.2	3.7	267
200	61	7.1	1.8	156	10.4	2.7	210			
250	76	6.5	1.7	168	9.6	2.5	229			
300	91	5.8	1.5	180	9.1	2.4	256			
350	107	5.4	1.4	192	8.3	2.2	276			
400	122	5.0	1.2	198						
450	137	4.7	1.2	204						
500	152	4.2	1.1	216						
550	168	4.1	1.1	219						
600	183	3.7	1.0	222						

**SunRise™
Solar Submersible
PERFORMANCE CHART**

Performance measured at 60V (typical working voltage from a 48V nominal PV array)
 Performance may vary ± 10%
 For battery system, subtract 15% from Flow and from Watts, due to lower working voltage

Fig. 14.7- Capacidad de Extracción (Serie 5200)
 (Cortesía de Dankoff Solar Pumps)

Nuestra altura dinámica es de 52,45m (172ft). El modelo 5218 puede proporcionar 7,3 lt/min a 53m. Nuestro caudal (8,41 l/min) es un 15% superior al proporcionado por la bomba. Para compensar esta deficiencia investigamos el uso de un seguidor automático. Encontramos que su uso aumenta la duración del día solar en un 12% (0,6hrs). El nuevo caudal instantáneo se reduce a 7,51lt/min. La diferencia, 0,21lt/min (menor que el 3%) podemos considerarla como una reducción del margen de seguridad, el que aún representa un amplio porcentaje (17%). Debemos recordar que los valores de caudal instantáneo dado por el fabricante están afectados por un error de +/-10%, de acuerdo a la hoja de especificaciones.

Verificando la altura dinámica

La bomba seleccionada usa un caño de plástico flexible de 3/4" de diámetro. La longitud de nuestra cañería es 51,42m (168.7ft). el nuevo caudal (7,51lt/min) es cercano a los 2G/min. De las tablas, el porcentaje de altura equivalente para este tipo de caño es de alrededor de 1,04% o 1,75ft (0,534). La instalación recomendada por el fabricante (Fig 14.7) muestra el uso de una válvula unidireccional, la que agrega (Tabla I) un 5%

CAPITULO 14- BOMBEO DE AGUA SOLAR

EJEMPLO DE DISEÑO

de longitud lineal (8,44ft) y un codo de 90°, el que añade un 2% extra (3,37ft). Esta longitud extra (11,81ft) se traduce en una altura equivalente de 0,123ft (0,0375m) para el tipo de caño usado. Las pérdidas mecánicas se traducen en una altura equivalente de 0,57m. Esta cantidad representa el 1,1% de la longitud de cañería, de manera que el 2% de pérdidas asumido en el cálculo no ha sido sobrepasado.

NOTA

Obsérvese que la contribución del codo y la válvula (0,0375m) es un orden de magnitud menor que la fricción en la cañería (0,534m).

Diseño de la fuente de generación

El fabricante indica que para las condiciones del problema este modelo requiere 144W, con un voltaje nominal de 60V. Este último valor nominal para el voltaje de trabajo sólo puede obtenerse si se conectan 5 paneles en serie. Asumiendo un 3% de pérdidas en los cables (eficiencia de 0,97), una eficiencia de 0,95 para el motor y de 0,85 para el controlador, la eficiencia eléctrica del sistema (producto de las tres) será de 0,78. La potencia eléctrica a generarse está dada por:

$$144 / 0,78 = 184.6W$$

Una vez que el tanque de reserva ha sido llenado, el caudal diario baja un 10%, ya que sólo deberá bombearse el consumo diario deseable. Esto hace que baje el requerimiento energético.

Caudal de salida de la cisterna

Los 3,92m (12,86ft) de altura que alcanza el agua en la cisterna representan una presión de 5,6psi (3,92 x 3,28 x 0,434). Si reducimos este valor de diferencia de presión al del valor porcentual de pérdidas (5,6 x 2,31, o 12,9%) podemos determinar el diámetro del caño plástico de salida, utilizando la Tabla II. Por ejemplo, si el diámetro es de 1/2", el caudal mínimo de salida alcanzará los 13lt/min. Si aumentamos el diámetro a 1", el caudal mínimo será de 53lt/min.

Instalación

El diagrama de instalación está dado en la Figura 14.8.

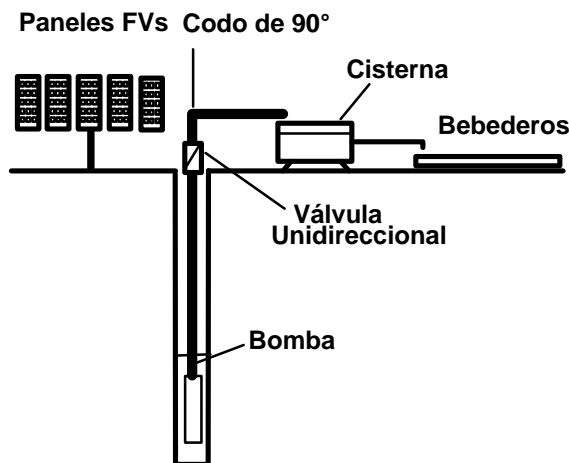


Fig. 14.8- Esquema de Instalación

EJEMPLO DE DISEÑO

La incorporación de una válvula unidireccional (*check valve*, en inglés) se hace necesaria para evitar que el agua acumulada en la cañería de alimentación a la cisterna ejerza presión cuando la bomba no trabaja. El adaptador de impedancias, llamado a veces controlador, se conecta entre la salida de los paneles y la alimentación al motor de la bomba. Este aparato permite el arranque del motor a horas más tempranas. Para evitar el desborde del tanque es aconsejable usar un interruptor automático, colocado en el borde superior del tanque, el que actúa cuando el agua alcanza el nivel de reserva. El uso de un filtro alrededor de la zona de toma de la bomba es importante, para evitar que los depósitos de arena penetren en la bomba. El diámetro de la bomba determina el diámetro aconsejable para el pozo. Las bombas solares tienen un gancho en su parte superior. Una soga de plástico es atada al gancho, facilitando su colocación o remoción del pozo. Esto evita usar los cables eléctricos para este propósito.

Pérdidas por Fricción

TABLA I
Valor equivalente (en pies) de cañería sin curvatura

Tipo de conexión	Diámetro en pulgadas		
	1/2"	3/4"	1"
Codo de 90°	1,5	2,0	2,7
Codo de 45°	0,8	1,0	1,7
Retorno cerrado (en "U")	3,6	5,0	6,0
Válvula Unidireccional (s/r)*	4,0	5,0	7,0
Válvula Unidireccional (c/r)**	4,0	6,0	8,0

* s/r significa sin resorte

** c/r significa con resorte

TABLA II
 (% por cada 100')

Diámetro: 1/2"

Diámetro: 3/4"

Caudal Gal./m	MATERIALES			MATERIALES			Caudal Lts/m
	Acero C-100	Cobre C-130	Plástico PVC ¹	Acero C-100	Cobre C-130	Plástico PVC	
0,5	0,58	0,35	0,31	—	—	—	1,89
1,0	2,10	1,26	1,14	—	—	—	3,7854
1,5	4,44	2,67	2,38	1,13	0,70	0,61	5,68
2,0	7,57	4,56	4,10	1,93	1,21	1,04	7,57
2,5	11,40	6,88	6,15	2,91	1,82	1,57	9,46
3,0	16,00	9,66	8,65	4,08	2,56	2,21	11,36
3,5	21,30	12,90	11,50	5,42	3,40	2,93	13,25
4,0	27,30	16,40	14,80	6,94	4,36	3,74	15,14
4,5	33,90	20,40	18,30	8,63	5,40	4,66	17,03
5,0	41,20	24,80	22,20	10,50	6,57	5,66	18,92
6,0	57,80	34,80	31,20	14,70	9,22	7,95	22,71
7,0	76,80	46,10	41,50	19,50	12,20	10,60	26,50
8,0	98,30	59,40	53,00	25,00	15,70	13,50	30,28
9,0	122,00	73,5	66,00	31,10	19,50	16,80	34,07
10,0	149,00	89,4	80,50	37,8	23,70	20,40	37,85

Pérdidas por Fricción

(% por cada 100')

TABLA II

Diámetro: 1"

Diámetro: 1,5"

Caudal Gal./m	MATERIALES			MATERIALES			Caudal
	Acero C-140	Cobre C-100	Plástico PVC ¹ C-140	Acero C-100	Cobre PVC	Plástico Lts/m	
1,0	—	—	—	—	—	—	3,7854
2,0	0,59	0,35	0,32	—	—	—	7,57
3,0	1,26	0,73	0,68	—	—	0,09	11,36
4,0	2,14	1,24	1,15	0,26	0,17	0,10	15,14
5,0	3,42	1,88	1,75	—	—	0,21	18,92
6,0	4,54	2,63	2,45	0,57	0,36	0,30	22,71
8,0	7,73	4,50	4,16	0,96	0,61	0,52	30,28
10,0	11,70	6,77	6,31	1,45	0,92	0,79	37,85
12,0	16,40	9,47	8,85	2,04	1,29	1,10	45,42
14,0	21,80	12,60	11,80	2,71	1,71	1,46	53,00
16,0	27,90	16,20	15,10	3,47	2,20	1,87	60,56
18,0	34,70	20,10	18,70	4,31	2,75	2,33	68,13
20,0	42,10	24,40	32,80	5,24	3,31	2,83	75,70
24,0	59,00	34,00	31,90	—	—	—	90,85
25,0	—	—	—	7,90	5,00	4,26	94,64
30,0	89,20	51,60	48,10	11,10	7,00	6,00	113,56
35,0	119,00	68,70	64,30	14,70	9,35	7,94	132,49
40,0	152,00	88,00	82,00	18,90	12,00	10,20	151,42
45,0	189,00	109,00	102,00	23,40	14,09	12,63	170,34
50,0	—	—	—	28,50	18,10	15,40	189,27