



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

**DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS DE BOMBEO PARA AGUA
ACCIONADOS POR MOTORES ELECTRICOS**

VICTOR ARON ORTEGA ZELADA

Asesor: Ing. Luis Augusto Menegazzo Gil

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2005

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS DE BOMBEO PARA AGUA
ACCIONADOS POR MOTORES ELECTRICOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

VICTOR ARON ORTEGA ZELADA

ASESORADO POR EL ING. LUIS AUGUSTO MENEGAZZO GIL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2005

ONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS DE BOMBEO PARA AGUA ACCIONADOS POR MOTORES ELECTRICOS,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 2 de junio de 2,005.

Victor Aron Ortega Zelada

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|---------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| VOCAL I | |
| VOCAL II | Ing. Amahán Sánchez Álvarez |
| VOCAL III | Ing. Julio David Galicia Celada |
| VOCAL IV | Ing. Kenneth Issur Estrada Ruíz |
| VOCAL V | Br. Elisa Yazminda Vides Leiva |
| SECRETARIA | Ing. Marcia Ivonne Véliz Vargas |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Sydney Alexander Samuels Milson |
| EXAMINADOR | Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo |
| EXAMINADOR | Ing. Marvin Marino Hernández Fernández |
| EXAMINADOR | Ing. Armando Gálvez Castillo |
| SECRETARIO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|---|---|
| Dios | No a nosotros, oh Jehová, no a nosotros, sino a Tu Nombre da gloria -Salmo 115:1- A Ti Dios trino todopoderoso, eterno, fiel, verdadero e invencible. En Ti me he deleitado y Tu has concedido las peticiones de mi corazón. |
| MIS PADRES | Por haber sido el apoyo humano más importante en mi formación. |
| MI ESPOSA E HIJO | Por su entusiasmo, comprensión y paciencia durante la elaboración de este trabajo. |
| LA FAMILIA BARCKHAUSEN | Don Manfred †, Doña Hanny y sus hijos por el valioso apoyo en mi realización profesional. |
| MI ASESOR Y COMPAÑEROS DE TRABAJO | Ing. Luis Augusto Menegazzo Gil por su asesoría en el desarrollo del presente trabajo. Ing. Francisco Schutt, Sr. Herbert Hoffmann, Ing. Oscar Torres, Ing. Mario Figueroa, Ing. Fernando Samayoa, Roberto Cabrera, Ing. Hernán Pinto y demás compañeros, por la paciencia y el apoyo brindados. |
| MIS COMPAÑEROS DE ESTUDIO Y AMIGOS | Por su ayuda y tiempo brindado, en especial a Manzo, Coló, Ralda, Guillén, Fuentes, Allan Sac, Quijivix, Rodrigo Basterrechea, Guillermo Corado, Alejandro Martínez. |

ACTO QUE DEDICO A:

Dios Por ser fiel y verdadero al permitirme alcanzar esta meta.

MIS PADRES Victor Aron Ortega Gil.
Agueda Corina Zelada de Ortega.

MI ESPOSA Ana Lorena Castillo de Ortega.

MI HIJO Manfred Josué Ortega Castillo.

MIS HERMANOS Leticia, Cecilia, Verónica, Aldo, Rafael, Elisa, José y Damaris.

MI FAMILIA, EN Respetuosamente a mis tíos, primos, sobrinos,
GENERAL cuñados y suegros.

LAS EMPRESAS QUIMICA HOECHST, HIDROTECNIA Y DAHO POZOS.

LA FACULTAD DE INGENIERÍA.

LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES..... | V |
| GLOSARIO..... | VII |
| RESUMEN..... | IX |
| OBJETIVOS..... | XI |
| INTRODUCCIÓN..... | XIII |
| 1. CONCEPTOS BÁSICOS DE BOMBEO PARA AGUA..... | 1 |
| 1.1 Antecedentes históricos..... | 1 |
| 1.2 Puntos básicos..... | 2 |
| 1.2.1 Introducción a las bombas centrífugas..... | 2 |
| 1.2.2 Carga neta de succión positiva..... | 2 |
| 1.2.3 Cavitación..... | 3 |
| 1.3 Cómo se genera la carga en una bomba..... | 5 |
| 1.3.1 Carga total (H)..... | 6 |
| 1.3.2 Carga estática de descarga (hd)..... | 6 |
| 1.3.3 Carga estática de succión (hs)..... | 6 |
| 1.3.4 Carga de fricción en la descarga (fa)..... | 7 |
| 1.3.5 Carga de velocidad ($vd^2/2g$)..... | 7 |
| 1.4 Tipos de bombas de agua..... | 7 |
| 1.4.1 Bombas de desplazamiento constante..... | 7 |
| 1.4.2 Bombas de desplazamiento variable..... | 8 |
| 1.5 Criterios de selección..... | 10 |
| 1.5.1 Fuentes de agua..... | 10 |
| 1.5.2 Profundidad de succión..... | 10 |
| 1.5.3 Diferencia de altura distancia de bombeo y caudal de bombeo..... | 11 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1.5.4 | Disponibilidad de energía..... | 11 |
| 1.6 | Componentes principales de una bomba centrífuga..... | 12 |
| 1.6.1 | Voluta – Difusor..... | 12 |
| 1.6.2 | Impulsor..... | 13 |
| 1.7 | Determinación de la capacidad de una bomba..... | 14 |
| 1.8 | Potencia y eficiencia..... | 15 |
| 1.9 | Leyes de afinidad..... | 17 |
| 2. | BOMBA DE AGUA PARA SUPERFICIE (CENTRÍFUGA)..... | 21 |
| 2.1 | Introducción..... | 21 |
| 2.2 | Clasificación según succión..... | 21 |
| 2.2.1 | Succión positiva..... | 21 |
| 2.2.2 | Succión negativa..... | 22 |
| 2.3 | Tipos de accionamientos..... | 23 |
| 2.3.1 | Motor de combustión..... | 23 |
| 2.3.2 | Motor eléctrico..... | 24 |
| 2.3.3 | Otros tipos..... | 24 |
| 2.4 | Esquema de montaje..... | 25 |
| 3. | BOMBA SUMERGIBLE PARA AGUA (PROFUNDIDAD)..... | 27 |
| 3.1 | Introducción..... | 27 |
| 3.2 | Tipos..... | 27 |
| 3.2.1 | Tipo de turbina normal..... | 27 |
| 3.2.2 | Tipo de turbina vertical..... | 30 |
| 3.3 | Tipos de accionamientos..... | 31 |
| 3.3.1 | Motor de combustión..... | 31 |
| 3.3.2 | Motor eléctrico..... | 32 |
| 3.4 | Esquema de montaje..... | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 4. PANELES DE CONTROL PARA SISTEMAS DE BOMBEO... | 37 |
| 4.1 Diagramas unifilares..... | 37 |
| 4.2 Capacidad eléctrica de la fuente de energía..... | 38 |
| 4.2.1 Dimensionado del generador..... | 38 |
| 4.2.2 Dimensionado del transformador..... | 38 |
| 4.3 Componentes del panel de control..... | 39 |
| 4.3.1 Gabinete metálico..... | 39 |
| 4.3.2 Interruptor Electromagnético..... | 40 |
| 4.3.3 Arrancador..... | 40 |
| 4.3.3.1 Electromagnético..... | 40 |
| 4.3.3.2 Electrónico..... | 41 |
| 4.3.4 Protecciones..... | 42 |
| 4.3.4.1 Protección de Presión..... | 42 |
| 4.3.4.2 Protección de flujo..... | 43 |
| 4.3.4.3 Protección por bajo y alto voltaje..... | 43 |
| 4.3.4.4 Protección contra bombeo en seco..... | 44 |
| 4.3.4.5 Protección contra picos de voltaje..... | 47 |
| 4.3.4.6 Protección contra arranque intermitente..... | 47 |
| 4.3.5 Mando y señalización..... | 47 |
| 4.3.6 Accesorios para empalme y conexiones..... | 49 |
| 4.4 Conductores eléctricos..... | 50 |
| 4.4.1 Convencionales..... | 50 |
| 4.4.2 Sumergibles..... | 51 |
| 5. ANÁLISIS ECONÓMICO PARA AMBOS SISTEMAS..... | 55 |
| 5.1 Sistema integral de bombeo..... | 55 |
| 5.1.1 Extracción de agua de un pozo profundo a una cisterna Intermedia..... | 55 |
| 5.1.2 Rebombeo de cisterna intermedia hacia tanque principal elevado..... | 69 |

| | | |
|---------|---|-----------|
| 5.1.2.1 | Utilizando bomba centrífuga..... | 69 |
| 5.1.2.2 | Utilizando bomba sumergible..... | 72 |
| 5.2 | Análisis económico de un equipo centrífugo..... | 73 |
| 5.2.1 | Ventajas..... | 74 |
| 5.2.1.1 | Técnicas..... | 74 |
| 5.2.1.2 | Económicas..... | 74 |
| 5.2.2 | Desventajas..... | 75 |
| 5.2.2.1 | Técnicas..... | 75 |
| 5.2.2.2 | Económicas..... | 76 |
| 5.3 | Análisis económico de un equipo sumergible..... | 76 |
| 5.3.1 | Ventajas..... | 77 |
| 5.3.1.1 | Técnicas..... | 77 |
| 5.3.1.2 | Económicas..... | 78 |
| 5.3.2 | Desventajas..... | 78 |
| 5.3.2.1 | Técnicas..... | 78 |
| 5.3.2.2 | Económicas..... | 79 |
| | CONCLUSIONES..... | 81 |
| | RECOMENDACIONES..... | 83 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 85 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | |
|--|----|
| 1. Punto de operación de una bomba centrífuga..... | 7 |
| 2. Punto de operación de una bomba operando a varias Velocidades..... | 9 |
| 3. Curvas carga-capacidad de tres bombas centrífugas de diferente velocidad específica..... | 15 |
| 4. Curvas de potencia y eficiencia de una bomba común en sistemas de bombeo..... | 16 |
| 5. Curvas normalizadas de bombas centrífugas a diferentes velocidades específicas..... | 18 |
| 6. Aspecto de una bomba centrífuga horizontal..... | 22 |
| 7. Recomendaciones para el montaje de una bomba centrífuga Horizontal..... | 26 |
| 8. Equipos de bombeo para pozo profundo..... | 28 |
| 9. Bombas para pozo profundo..... | 30 |
| 10. Montaje de una bomba tipo turbina en un tanque a poca Profundidad..... | 33 |
| 11. Diagrama elemental para el control de un motor, en un sistema de bombeo..... | 37 |
| 12. Diagrama de conexión básico de un guarda nivel..... | 45 |
| 13. Sistema de bombeo sumergible de pozo a cisterna elevado..... | 56 |
| 14. Curva característica de bomba berkeley modelo 7T100-500..... | 60 |

| | |
|--|----|
| 15. Sistema de bombeo sumergible de cisterna adjunta a cisterna elevada..... | 62 |
| 16. Curva característica de bomba berkeley modelo 7T50-450..... | 64 |
| 17. Sistema de bombeo centrífugo (de superficie) de cisterna adjunta a cisterna elevada..... | 69 |
| 18. Curva característica de bomba berkeley modelo B2 ½ ZPL..... | 71 |
| 19. Curva característica de bomba berkeley modelo 7T30-350..... | 72 |

TABLAS

| | |
|--|----|
| I. Características de cable para motor trifásico sumergible..... | 66 |
| II. Características de motor trifásico sumergible..... | 67 |
| III. Tabulación de costos de equipos para rebombeo a cisterna elevada..... | 80 |

GLOSARIO

| | |
|------------------|--|
| Alabe | Paleta de una rueda hidráulica, es decir, cada uno de los conductos o canales de un impulsor de una bomba. |
| Buje | Pieza central para sujetar las piezas destinadas a girar alrededor de un eje, palabra proveniente del inglés <i>bushing</i> . |
| Cabeza | Es la altura máxima a la que una bomba es capaz de elevar el agua. Es decir, el máximo punto de operación en el eje vertical de la curva característica de la bomba. |
| Cavitante | Punto de operación de una bomba en el cual se produce cavitación. |
| Chumacera | Soporte de un árbol de transmisión. |
| Difusor | Conducto que sirve para disminuir la velocidad de circulación de un fluido aumentando su presión. |
| Estopero | Componente de una bomba centrífuga, en donde se instala o coloca un sello especial conocido como estopa que sirve para evitar fugas entre el acople de energía rotatoria con el eje. |
| Generador | Máquina eléctrica rotatoria para la conversión de energía mecánica en eléctrica, por medio de la acción de un electroimán rotatorio para inducir una tensión eléctrica, |

normalmente, se les conoce, también como plantas de energía.

HP Unidad de medida de la potencia eléctrica real. Su nombre proviene del inglés *Horse Power*. Y es equivalente a 746 Watt.

Kilowatt Unidad de medida de la potencia eléctrica real equivalente a mil *watt*. Su nombre proviene del apellido del físico inglés, James Watt.

Transformador Máquina eléctrica estacionaria para la conversión de energía eléctrica alterna, de una combinación de valores de tensión y corriente a otros utilizando el principio de la autoinducción o ley de Faraday.

Voltaje Trabajo necesario para desplazar una carga eléctrica, su unidad de medida es el Voltio, en este trabajo los voltajes son eficaces, es decir (*rms*).

RESUMEN

El énfasis de este trabajo son los equipos de bombeo para agua, como las bombas centrífugas y sumergibles que son accionadas por motores eléctricos.

En la actualidad, la mayoría de estos equipos usan la energía eléctrica monofásica o trifásica para la conversión de energía eléctrica en energía mecánica y, luego, en energía hidráulica.

Dichos equipos pueden ser accionados, también, por dispositivos mecánicos directos o con ejes y poleas, como elementos variadores de velocidad, con energía mecánica proveniente de motores de combustión.

Se describen los principales equipos de bombeo para agua, haciendo ver sus diferencias, ventajas y desventajas.

La principal aplicación de los equipos sumergibles de bombeo es en los pozos profundos, aunque, se pueden utilizar en pozos manuales de baja profundidad o en los reservorios o cisternas para rebombeo.

Se hace un análisis de un sistema de bombeo en un sector del municipio de San Miguel Petapa, a manera de ilustrar los inconvenientes de la extracción de caudales considerablemente grandes, de pozos profundos con diámetros inadecuados, implicando esto la utilización de recursos para partir la carga y la potencia total del sistema de bombeo.

Hay lugares, en Guatemala, en los que no se dispone de energía eléctrica de una red de distribución, por ejemplo, el departamento de El Petén, donde las distancias son enormes entre una aldea y la otra, teniendo esto la implicación del uso de energía eléctrica por medio de generadores acoplados a motores de combustión interna. Es en estos casos, en los que los motores eléctricos están siendo utilizados con bastante frecuencia.

OBJETIVOS

➤ **General**

Estudiar los elementos que componen un sistema de bombeo de agua accionado por motores eléctricos.

➤ **Específicos**

1. Estudiar las características principales de los sistemas centrífugos de bombeo para agua.
2. Estudiar las características principales de los sistemas sumergibles de bombeo para agua.
3. Calcular costos en la implementación de sistemas centrífugos.
4. Calcular costos en la implementación de sistemas sumergibles.
5. Realizar una comparación económica entre los sistemas centrífugos y sumergibles para diferentes aplicaciones.

INTRODUCCIÓN

Nuestro asombro ante el más esencial de los elementos de la tierra que el ser humano ha aprendido a utilizar en sus estados líquido, sólido y vapor, nos lleva hasta el corazón de nuestro culto religioso. La Biblia abunda en testimonios que destacan la importancia del agua y su participación en el modo de vida establecido por nuestro Ser Supremo.

De aquí, la importancia de este vital líquido y para poder obtenerlo, trasegarlo y consumirlo, se utilizan máquinas que convierten la energía mecánica en energía cinética hidráulica. Estos equipos son llamados “EQUIPOS DE BOMBEO PARA AGUA” o simplemente “BOMBAS DE AGUA”.

En general, se clasifican los equipos de bombeo en dos categorías:

- 1) bombas de superficie, centrífugas;
- 2) bombas sumergibles, centrífugas de profundidad.

Según sea necesario o conveniente, los equipos de bombeo pueden ser accionados por motores de combustión interna, diesel o gasolina, motores eléctricos, monofásicos o trifásicos, o bien por energía eólica, viento.

El diseño y selección adecuada para cada aplicación de uno u otro equipo de bombeo está en beneficio de los costos del proyecto, sea industrial, comercial o residencial.

En este trabajo de graduación se definirán ambos métodos de bombeo y se considerarán las ventajas y desventajas de una u otra configuración toda vez sean los accionamientos por motores eléctricos, tanto monofásicos como trifásicos.

Además, se utilizarán las dimensionales para longitud, potencia real, caudal y revoluciones del motor, según la siguiente convención.

- Q: Caudal en galones por minuto (GPM)
- H: Altura o carga en metros o pies
- n: Velocidad de operación en rpm
- D: Diámetro exterior del impulsor en pulgadas
- P: Potencia en HP, la cual puede ser también medida en kW

Se diseñarán los controles eléctricos para una y otra configuración mencionando las diferencias en cada caso y sus respectivas ventajas o desventajas.

1. CONCEPTOS BÁSICOS DE BOMBEO PARA AGUA

1.1 Antecedentes históricos

Dios altísimo creó desde el principio los cielos y la tierra junto con el vital líquido llamado agua. Niéguesele a una persona el alimento y sobrevivirá durante días, pero, quítesele este vital líquido y le sobrevendrá la muerte en término de horas. Sólo la falta de aire lo aniquilaría antes.

Nuestro asombro ante el más esencial de los elementos de la tierra que el ser humano ha aprendido a utilizar en sus estados líquido, sólido y vapor, nos lleva hasta el corazón de nuestro culto religioso. La Biblia abunda en testimonios que destacan la importancia del agua y su participación en el modo de vida establecido por nuestro Ser Supremo.

El agua es una de las necesidades primordiales del ser humano, por lo cual siempre se ha buscado la forma de ahorrar esfuerzos para tener acceso inmediato al preciado líquido. Con tal fin desde tiempos remotos se ha conducido el agua hacia las poblaciones, desde fuentes (ríos, lagos, manantiales, etc.), cuya altura es superior a la de dicho poblado, por conducto de un sistema de gravedad constituido por tuberías y canales.

Con el aumento de las áreas urbanas se va requiriendo más agua, lo que hace necesario la búsqueda de nuevas fuentes. Sin embargo, debido a que la disponibilidad de fuentes a mayor altura del poblado que haga posible su conducción por gravedad, se hace cada vez menor.

Es necesario recurrir a fuentes situadas a una cota igual o inferior a la del punto de consumo, incluso a fuentes subterráneas (pozos profundos), usando sistemas de bombeo, para la extracción del vital líquido.

1.2 Puntos básicos

1.2.1 Los estados del agua

El agua puede existir en cualquier combinación de tres estados básicos: sólido, líquido y vapor. En forma de sólido, se conoce como hielo o nieve, que no puede ser bombeada.

En forma de vapor, tampoco puede ser bombeada, en la única forma que puede ser bombeada es en forma de líquido, una bomba puede bombear pequeñas cantidades de agua sólida o en vapor en algunos casos especiales, pero debe estar en suspensión y ser en su mayor parte líquidos. El agua puede cambiar de una forma a otra si se presentan las condiciones adecuadas. Si la temperatura baja a 32 F (grados *Fahrenheit*) al nivel del mar, el agua líquida se convierte en hielo sólido, y si la bomba no fue drenada, lo más probable es que falle, si se agrega energía al líquido y se aumenta la temperatura del agua líquida a 212 F al nivel del mar, el agua líquida hervirá y se convertirá en vapor.

1.2.2 Carga neta de succión positiva

La bomba centrífuga necesita una presión positiva para que el agua fluya hacia el impulsor. Si se diera una presión negativa el agua fluiría de la entrada de succión (hacia afuera) en vez de hacia ella (hacia adentro). Por eso decimos que se requiere una presión de succión positiva para operar la bomba.

NPSHR (*Net Positive Suction Head Required*) La carga neta de succión positiva requerida, es la cantidad de presión positiva que se necesita para que la bomba opere sin cavitación.

NPSHA (*Net Positive Suction Head Available*) Es la carga neta de succión positiva disponible. NPSHR nos indica lo que necesitamos. NPSHA es el cálculo de la presión de succión disponible. Si esta es mayor que la requerida, el sistema no cavitará. NPSHA es la suma de todas las presiones positivas, tales como la presión atmosférica o la elevación del agua sobre la entrada de la bomba, menos las presiones negativas, tales como la de succión, pérdida por fricción y los requerimientos de presión de vapor causados por una temperatura elevada del líquido.

1.2.3 Cavitación

La cavitación es una condición destructiva que puede reducir significativamente el rendimiento de la bomba y dañar seriamente los componentes. Es una condición predecible y en la mayoría de los casos evitable.

Toda materia puede existir en tres formas: como sólido, como un líquido, o como un gas. El agua se puede ver en forma de hielo, líquida y como vapor de agua, que comúnmente conocemos como vapor.

Los factores que determinan el estado del agua son la temperatura y la presión.

El agua hervirá a una temperatura alta si se aplica más presión a su superficie. Reducir de forma converso la presión externa reducirá el punto de ebullición.

La cavitación ocurre cuando la presión sobre un líquido es reducida a un valor menor que su presión de vapor, y este se transforma de su forma líquida a vapor. Pequeñas bolsas de este aparecen como burbujas diminutas (que no son burbujas de aire, ni están asociadas con fugas en la bomba o en la tubería), que se convierten de nuevo a líquido al incrementar la presión. En una bomba centrífuga esto sucede en los alabes del impulsor, normalmente a $\frac{1}{4}$ de distancia del eje. Este cambio físico suelta la energía absorbida al formar las bolsas de vapor causando una "implosión", que es lo opuesto de una explosión.

Todos los líquidos cambian a vapor o estado gaseoso al calentarse. Muchos líquidos incluyendo el agua, deben tener cierto tipo de presión atmosférica sobre ellos para mantenerse en ese estado. Si no hay suficiente presión en la superficie a la temperatura dada, el agua hervirá y se convertirá en vapor. Existen varias formas de detectar la cavitación:

- Sonido
- Vibración
- Daño
- Baja en el rendimiento

Para que una bomba centrífuga produzca cavitación deben existir las siguientes condiciones:

- Un aumento en la altura de succión estática.

- Una reducción en la presión atmosférica causada por un aumento en la elevación.
- Un aumento en la temperatura del líquido que se está bombeando.
- Un cambio en el patrón del flujo del líquido causado por una obstrucción o un giro.

La cavitación no es incorregible. Si se presenta, se pueden tomar medidas correctivas para eliminar el problema:

- Aumentar el tamaño de la tubería de succión.
- Reducir el largo total de dicha tubería.
- Reducir la altura de succión estática, colocar la bomba más cerca de la fuente.
- Eliminar giros en la tubería, especialmente los que se encuentran justamente alrededor de la conexión de succión de la bomba.
- Reemplazar la bomba.

1.3 Cómo se genera la carga en una bomba

El agua corre de una altura mas elevada a una altura menos elevada debido a la atracción de la gravedad. El mayor potencial de la energía en el punto más alto es la fuente de poder que mueve el agua a través de la tubería.

Carga es el término utilizado para describir la cantidad de energía presente en cada libra de líquido, las unidades de medición de la energía son “libras/pie” la energía por libra es $(\text{pie}) \times (\text{libra}) / (\text{libra})$, así las unidades de carga se convierten en “pies de carga”. Los pies de carga se pueden visualizar como la altura a la que el agua se elevaría en un tubo vertical sin tapa, al aplicar la carga en el fondo.

La velocidad es la rapidez instantánea a la que un objeto viaja en un lugar determinado. La velocidad promedio del agua fluyendo por una tubería en pies por segundo (pie/s), se puede calcular con la formula:

$$\text{Velocidad} = \text{Caudal (Q)} \times 0.321 / (\text{A})$$

En donde Q es la velocidad de flujo en galones por minuto (GPM) y (A) es el área en pulgadas cuadradas.

1.3.1 Carga total (H)

Se conoce también como carga dinámica total (CDT); y es la cabeza (altura máxima de operación de la bomba) ejercida por una bomba cuando bombea la capacidad deseada, todas las cabezas son medidas en pies o metros del fluido que se está bombeando.

1.3.2 Carga estática de descarga (hd)

Es la distancia vertical del centro de la bomba a la superficie del fluido en el punto de descarga. Se mide en metros o en pies.

1.3.3 Carga estática de succión (hs)

Es la distancia vertical entre la superficie del fluido a succionarse al centro de la bomba. Puede haber cabezas de succión positiva o negativa dependiendo de que si el fluido está arriba o abajo de la línea central de la bomba. Se mide en metros o en pies.

1.3.4 Carga por fricción en la descarga (fa)

Es la cabeza necesaria para vencer la fricción en la tubería de succión, por causa de la longitud de la tubería y accesorios. Se mide en metros o en pies.

1.3.5 Carga de velocidad ($Vd^2 / 2g$)

Puede ser definida como la cabeza requerida que causa que el agua alcance la velocidad "V". Esta carga se mide en pies o en metros. Todo lo anterior se puede resumir en la siguiente ecuación.

$$H (CDT) = h_d \pm h_s + f_d + f_s + (Vd^2 / 2g)$$

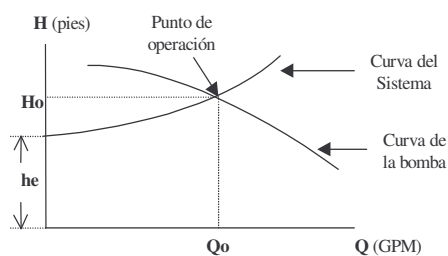
Esta carga dinámica total, se mide en metros o en pies.

1.4 Tipos de bombas de agua

1.4.1 Bombas de desplazamiento constante

Si la bomba opera a una determinada velocidad, el caudal que puede suministrar en determinadas condiciones o punto de operación, puede determinarse superponiendo la curva del sistema sobre el gráfico de la curva característica de la bomba.

Figura 1. Punto de operación de una bomba centrífuga



Fuente: elaboración propia

La intersección de estas dos curvas será el punto de operación de la bomba, tal como se muestra en la figura 1.

1.4.2 Bombas de desplazamiento variable

La figura 2 muestra las curvas de una bomba operando a varias velocidades sobre la cual se observa además una supuesta curva del sistema 1 (CS1).

El punto de operación (Q, H) de la bomba estará dado por la intersección de la CS1 con la curva de velocidad a la cual esté operando la bomba.

Por ejemplo, si la bomba opera en la curva de 940 rpm, lo hará en el punto P1 (véase la figura 2) correspondiente a un caudal y CDT de alrededor de 37,800 GPM y 210 pies, con una eficiencia del 86%, que se puede observar en la curva de eficiencia respectiva, y una potencia al eje superior a los 2,000 HP (aproximadamente, $BHP = \frac{(37800 \text{ GPM})(210 \text{ pies})}{3960 (\text{constante}) \times 0.86} = 2,330 \text{ HP}$, SG = 1).

$$3960 (\text{constante}) \times 0.86$$

Igualmente, si la bomba opera a 590 rpm, lo hará en el punto P2, correspondiente a 13,750 GPM, con una CDT de 108 pies, al 83% de eficiencia y con una potencia inferior a los 500 HP.

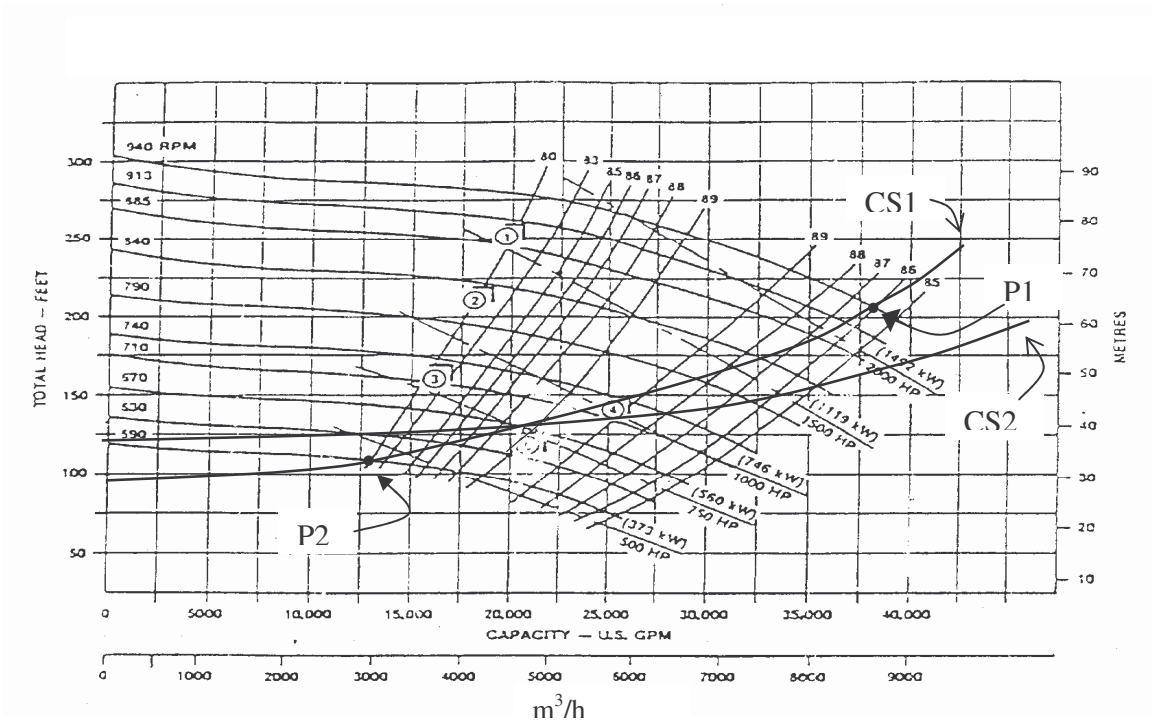
$$(BHP = \frac{(13,750 \text{ GPM})(108 \text{ pies})}{(3960)(0.83)} = 452 \text{ HP}).$$

En la misma figura 2, puede observarse también la curva de un segundo sistema (CS2). Supongamos que por alguna maniobra de válvulas la bomba es obligada a descargar en este segundo sistema.

Supongamos además que la bomba no debe operar a bajo caudal en regiones hacia la izquierda de la curva del 80% de eficiencia, ni tampoco a altos caudales en regiones hacia la derecha de la curva del 85% de eficiencia.

Con las anteriores limitantes al descargar la bomba en el sistema 2, en la figura 2 podemos ver que la bomba no deberá operar a velocidades superiores a las 840 rpm, ni a velocidades inferiores a las 630 rpm.

Figura 2. Punto de operación de una bomba operando a varias velocidades



Fuente: Manual de bombas centrifugas Goulds

Al aumentar la velocidad del impulsor, en la práctica se ha encontrado aumentos de hasta 15% de eficiencia para aumentos del 100% de la velocidad. Los incrementos son menores a incrementos de velocidad menores.

Sin embargo, la vida del motor y de la bomba disminuirá al aumentar la velocidad, ya que aumentan los daños por abrasión y desgaste, particularmente en las bombas si el fluido contiene partículas sólidas en suspensión.

Adicionalmente, el peligro por cavitación aumenta al aumentar la velocidad, a menos que se cumpla con ciertos requerimientos en la succión, como se verá después.

Por tanto, al operar una bomba a varias velocidades, lo más aconsejable y prudente es hacerlo a velocidades inferiores de la velocidad nominal de operación especificada por el fabricante.

1.5 Criterios de selección

1.5.1 Fuentes de agua

Es el punto de abastecimiento de agua a bombear. Puede ser un río, nacimiento, lago, manantial, un tanque de captación de caudal a baja presión, o un pozo profundo.

1.5.2 Profundidad de succión

Los equipos de bombeo poseen dos partes vitales que son, la succión y la descarga, como el nombre lo indica la succión es la parte donde se comienza la transformación de la energía mecánica en energía hidráulica por el efecto de

succión que es provocado por la fuerza centrífuga del impulsor al momento de bombear.

La distancia del plano superficial al punto de succión de la bomba, denota la profundidad de succión.

1.5.3 Diferencia de altura distancia de bombeo y caudal de bombeo

Estos son parámetros vitales para el diseño de un equipo de bombeo, la diferencia de altura como su nombre lo indica es la diferencia de cota entre el punto de bombeo y el tanque o punto de entrega o descarga en el tanque.

La distancia de bombeo es la longitud efectiva de la línea de conducción entre el punto de bombeo y el tanque o punto de descarga.

El caudal de bombeo es la razón de volumen/tiempo del fluido bombeado, se mide normalmente en galones por minuto (GPM) o en metros cúbicos/hora, dependiendo la magnitud del proyecto.

1.5.4 Disponibilidad de energía

Para diseñar un equipo de bombeo, se tiene que considerar el tipo de energía para el accionamiento de dicho equipo, es decir, se tiene que verificar si el accionamiento será por energía mecánica o energía eléctrica.

En el caso de energía mecánica se consideran los equipos directamente accionados por el viento, o bien los accionados por medio de motores de combustión interna.

En el caso de energía eléctrica se considera la disponibilidad de energía eléctrica monofásica o trifásica, sea por medio de una línea de distribución local o bien por medio de un grupo generador (planta eléctrica).

1.6 Componentes principales de una bomba centrífuga

Las bombas centrífugas comprenden una clase de maquinaria de bombeo, en la cual el bombeo de fluido o la generación de carga es efectuado por movimiento de rotación de uno o más impulsores. La gran variedad de bombas centrífugas se puede reducir a unos pocos tipos. Cada bomba consiste en tres partes principales. Un impulsor, el cual fuerza al fluido a un movimiento rotacional. Una voluta o envoltura de la bomba, la cual dirige el fluido a la salida de alta presión; y un motor para poner el impulsor en movimiento de rotación.

1.6.1 Voluta – Difusor

El agua no se puede utilizar a una velocidad tan alta como con la que sale del impulsor, a esta velocidad, las pérdidas por fricción serían exageradas y la erosión causada sería inaceptable. Por lo tanto la bomba debe de juntar el líquido a alta velocidad que sale del impulsor y convertirlo en energía por presión que pueda ser utilizada para mover agua por el sistema.

Esto se maneja en la voluta y el difusor. La voluta es un rollo con forma de espiral que rodea al impulsor, comienza en la entrada de la bomba y va aumentando su área para ir juntando el aumento del flujo de la periferia del impulsor hasta llegar a la descarga de la voluta. La parte de la cubierta que se encuentra entre la descarga de la voluta y la brida es el difusor.

Es una región cónica diseñada cuidadosamente para disminuir la velocidad del líquido de 60 a 50 pie/s a 30 ó 20 pie/s en la salida de descarga de la bomba.

Este cuidadoso aumento en área producido por el difusor convierte la energía de carga por velocidad agregada por el impulsor, en energía de carga por presión para empujar el agua a través del sistema. La conversión de energía sucede como lo describe Bernoulli, con las variables presión P, carga de velocidad $V^2/2g$ medidas en pies o en metros, la constante queda como:

$$(P + (V^2 / 2g) + 2) = \text{CONSTANTE}$$

1.6.2 Impulsor

De acuerdo con la mayor dirección del flujo en referencia a los ejes de rotación las bombas centrífugas pueden tener:

- Impulsores de flujo radial
- Impulsores de flujo axial
- Impulsores de flujo mixto, combina los principios de axial y radial.

Estos impulsores están clasificados de acuerdo con el flujo dentro de los filos de los álabes o aspas.

- Succión simple, una sola entrada en un solo lado.
- Succión doble con flujo de agua hacia el impulsor simétricamente de ambos lados.

De acuerdo con sus construcciones mecánicas los impulsores son de las siguientes categorías:

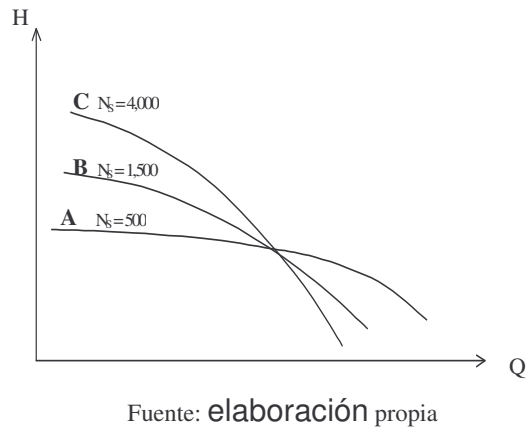
- Cerrados, con paredes cubiertas de flujo cerrado.
- Abiertos, sin cubiertas, (álabes abiertos).
- Semiabiertos o Semicerrados.
- Una bomba de un solo impulsor se llama bomba simplemente escalonada, (o de una etapa).

1.7 Determinación de la capacidad de una bomba

La curva característica carga-capacidad de una bomba, en términos de su velocidad específica N_s (hace que tenga ciertas particularidades que la hace más o menos apropiada; según las necesidades del bombeo. La figura 3 muestra tres curvas Q-H de tres diferentes velocidades específicas.

La curva A, de baja velocidad específica y flujo radial (tipo centrífuga horizontal), manifiesta gran variación de caudal para pequeñas variaciones de presión. La curva C de mediana velocidad específica y flujo mixto (tipo para pozo profundo), contrariamente, presenta pequeñas variaciones de caudal para grandes variaciones de cabeza o presión.

Figura 3. Curvas carga-capacidad de tres bombas centrífugas de diferente velocidad específica



1.8 Potencia y eficiencia

La potencia hidráulica transmitida al fluido (*LHP*, del inglés *liquid horse power*, en HP) es función del caudal (*Q*, en GPM) y de la carga dinámica total CDT (en pies) en la descarga de la bomba:

$$LHP = (Q \times CDT \times SG) / (3,960) \text{ donde, SG es la gravedad específica y } 3,960 \text{ factor de compensación, ambos adimensionales.}$$

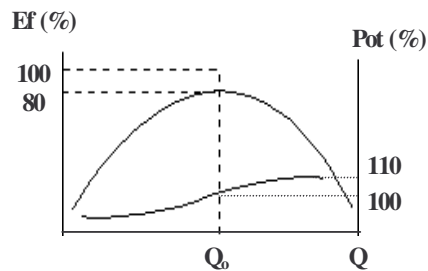
La eficiencia (*Eff*) es la relación entre la potencia hidráulica (*LHP*) de salida de la bomba y la potencia proporcionada en el eje de la bomba (*BHP*) por el motor se mide en % como se muestra en la figura 4.

$$Eff = (LHP) / (BHP) = (Q \times CDT \times SG) / (3960 \times WHP)$$

Donde, *BHP* (*Break Horse Power*): Potencia de frenado del motor, o potencia mecánica transmitida al eje de la bomba. Se mide en HP.

Las curvas de eficiencia y potencia de usos comunes porcentuales, son las mostradas en la figura 4, aunque pueden variar según el diseño del impulsor.

Figura 4. Curvas de potencia y eficiencia de una bomba común en sistemas de bombeo



Fuente: Elaboración propia

Por supuesto, *BHP* es mayor que *WHP*, debido a las pérdidas mecánicas (cojinetes, estoperos y demás fricciones e inercia), pérdidas volumétricas (fugas de agua a través de laberintos internos y prensa estopas) y pérdidas hidráulicas (por fricciones fluidas en todos los pasajes de flujo, incluyendo los álabes del impulsor).

Puesto que la potencia es el producto del torque por la velocidad, el par motor (*M*), o torque, (momento de rotación) de una bomba puede estimarse, usando las dimensionales apropiadas, por medio de la fórmula:

$$M = (5250 \times BHP) / N$$

Donde: M =par de la bomba en Lb-pie; BHP = potencia al eje de la bomba en HP; y , N = velocidad en revoluciones por minuto (rpm).

Si la bomba opera a velocidad constante, el par es proporcional al BHP , por lo que la curva del par (M) será de la misma forma que la de BHP (figura 4), por supuesto, con las magnitudes de escala apropiadas.

1.9 Leyes de afinidad

Para una serie de impulsores geoméricamente similares operados en condiciones dinámicamente similares, esto es, a velocidades específicas y eficiencias idénticas, se cumple que,

$$(Q_1 / Q_2) = (n_1 \times D_1^3) / (n_2 \times D_2^3)$$

$$(H_1 / H_2) = (n_1^2 \times D_1^2) / (n_2^2 \times D_2^2)$$

$$(P_1 / P_2) = (n_1^3 \times D_1^5) / (n_2^3 \times D_2^5)$$

Donde las condiciones de operación no cavitantes y las variables descritas son:

Q: Caudal en galones por minuto (GPM)

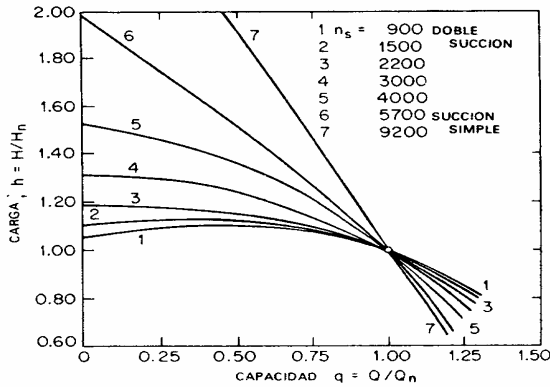
H: Altura o carga en metros o pies

n: Velocidad de operación en rpm

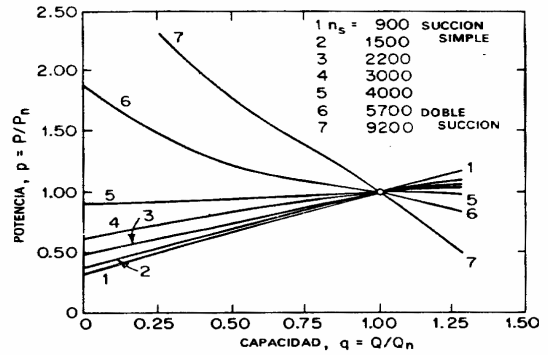
D: Diámetro exterior del impulsor en pulgadas

P: Potencia en HP, la cual puede ser BHP o WHP

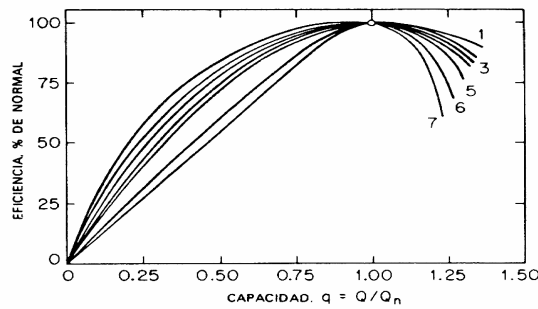
Figura 5. Curvas normalizadas de bombas centrífugas a diferentes velocidades específicas



A- Carga Vrs. capacidad



B- Potencia Vrs. capacidad



C- Eficiencia Vrs. capacidad

Fuente: Igor J. Karassik. Manual de bombas.

Con las ecuaciones, conocidas como leyes de afinidad, puede extenderse la información de operación de un impulsor o bomba con impulsores idénticos, con diámetro D_1 , operando a una velocidad n_1 y con parámetros Q_1 , H_1 Y P_1 , a otra condición de operación dinámicamente similar (N_s y eficiencia constantes) con diámetro D_2 , operando a velocidad n_2 y con parámetros Q_2 , H_2 y P_2 .

Puesto que nuestro interés se concentra en los cambios de velocidad, si suponemos que $D_1 = D_2$, las ecuaciones se convierten en:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1^3}{n_2^3}$$

2. BOMBA DE AGUA PARA SUPERFICIE (CENTRÍFUGA)

2.1 Introducción

Se emplean más bombas que cualquier otra máquina industrial, excepto el motor eléctrico, lo cual es debido a que se las usa en toda clase de sistemas para calefacción, enfriamiento, circulación, transferencia, drenaje, presurización y distribución de agua. Existen diversos tipos de bombas de acuerdo a su funcionamiento: centrífugas, reciprocantes, rotatorias, de desplazamiento por diferencia de presión, regenerativas, etc. El tipo de bomba más común, especialmente en sistemas de bombeo, es la centrífuga. Estos apuntes se refieren exclusivamente a ella y al agua como fluido.

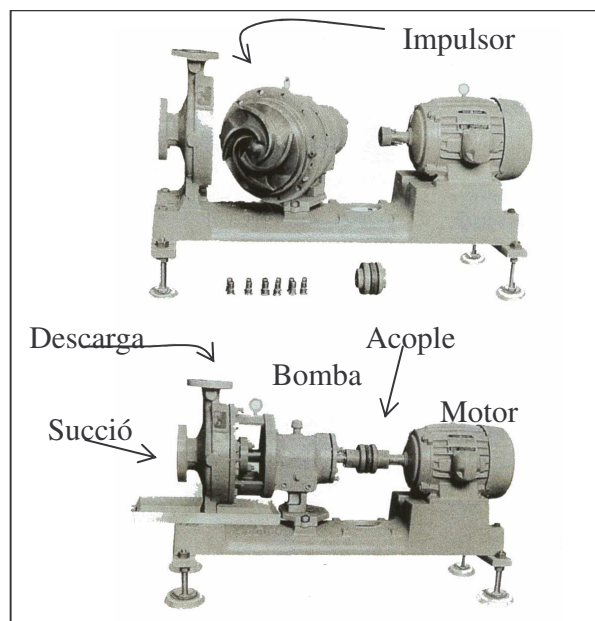
2.2 Clasificación según succión

2.2.1 Succión positiva

Su diseño de impulsor corresponde a velocidades específicas bajas, de 500 rpm a 1,500 rpm. Está prevista para trabajar en la superficie y generalmente acoplada directamente al motor; aunque en ocasiones la transmisión puede efectuarse a través de fajas o engranajes. Su aplicación se limita a fuentes de agua cuya profundidad respecto a la superficie del terreno es pequeña (altura de succión), para sistemas de bombeo se construyen en potencias que van desde ½ HP hasta 1,000 HP o más.

Las hay de un solo impulsor, de etapas múltiples en serie o bien doble etapa en paralelo (doble sección). La figura 6 muestra el aspecto de una bomba centrífuga horizontal.

Figura 6. Aspecto de una bomba centrífuga horizontal



Fuente: Manual de bombas centrífugas

Es un dispositivo mecánico que toma energía mecánica de una fuente externa y por la acción centrífuga de rotación la transfiere al líquido haciendo que su energía (del líquido) aumente en forma de presión, de elevación, de movimiento o en las tres formas.

2.2.2 Succión Negativa

La “succión” sólo es posible por acción de la presión atmosférica que actúa sobre la superficie del pozo que alimenta la bomba.

Puesto que la presión en la entrada de la bomba es menor que la atmosférica, existirá limitación en el funcionamiento de la bomba si se hace la instalación en forma que tienda a producirse en la succión de la bomba, presiones menores a la del vapor del agua, a la temperatura de operación.

Teóricamente al nivel del mar, la presión atmosférica es:

$$P = 14.7 \frac{\text{Lb}}{\text{Plg}^2} = 101497 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Si la densidad del agua, $\rho = 1000 \text{ (Kg. / m}^3\text{)}$; y la gravedad $g = 9.8 \text{ m/s}^2$.

Entonces, de la ecuación:

$$H = \frac{P}{\rho \times g} = \frac{101947}{1000 \times 9.8} = 10.3 \text{ metros}$$

Esto es, el máximo ascenso de succión para una bomba centrífuga al nivel del mar, sería idealmente 10.3 metros

2.3 Tipos de accionamientos

2.3.1 Por motor de combustión

Existen aplicaciones donde la fuente de energía mecánica para ser convertida en energía hidráulica, es un grupo motor de combustión interna sea por gasolina o por diesel.

Los accionamientos de este tipo son a gasolina para potencias bajas hasta el orden de 10 HP y para potencias superiores se utilizan motores diesel.

Este tipo de accionamientos tiene su aplicación preponderantemente en los sistemas de riego, donde la fuente de energía mecánica se acopla al equipo de bombeo por medio de una caja de transmisión especial denominada cardán.

2.3.2 Por motor eléctrico

En lugares donde se dispone de energía eléctrica sea por una red de distribución local, sea monofásica o trifásica, o bien, por un generador de energía (planta generadora), se hace posible accionar los equipos de bombeo por medio de motores eléctricos.

En el caso del sistema monofásico se tiene la limitación para el equipo centrífugo, que en el mercado existen motores monofásicos solamente hasta 10 HP.

En el sistema trifásico aplicado a equipos centrífugos las potencias varían desde $\frac{1}{3}$ HP hasta el orden de 1000 HP y más. Los niveles de voltaje pueden ser monofásicos 110 voltios ó 220 voltios y en su defecto trifásicos 230 voltios, 460 voltios ó 575 voltios.

2.3.3 Otros tipos

Es posible accionar equipos de bombeo por medio del viento, es decir, utilizando un sistema de molino de viento, que transforma la energía cinética del viento en energía mecánica rotatoria en el eje de la bomba por medio de un sistema de engranajes en ángulo.

Existen también equipos de bombeo accionados manualmente es decir, haciendo un movimiento de sube y baja en una palanca, se crea un vacío o efecto de succión que impulsa el agua hacia la superficie.

2.4 Esquema de montaje

A continuación se presentan los aspectos de primordial importancia durante el montaje, que influyen sobre la adecuada operación de la bomba centrífuga horizontal.

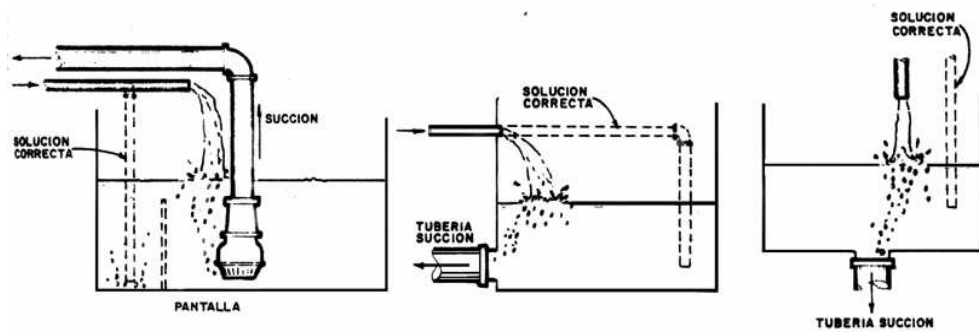
- Base. Debe ponerse especial atención al diseño y elaboración de la base que apoyará la bomba y motor, pues una inadecuada sujeción podría ocasionar vibraciones durante la operación.

- Alineamiento y acoplamiento. La correcta alineación del motor y la bomba es necesaria para evitar problemas de vibración y sobre esfuerzos en los cojinetes y chumaceras. Los acoples o fajas de transmisión, deberán ser de dimensiones y materiales adecuados para cada caso particular.

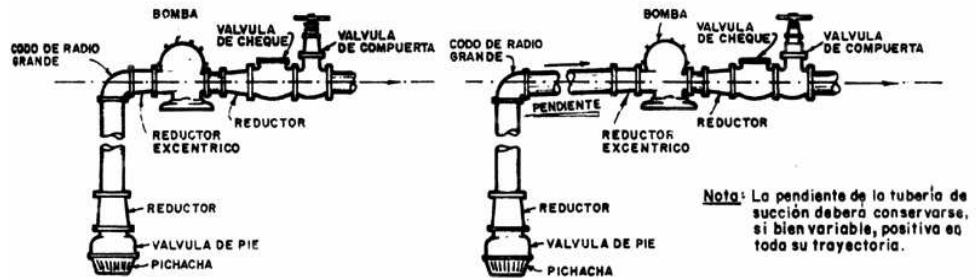
- Tubería y accesorios. Como referencia para la siguiente descripción, véase la figura 7.

Las dimensiones y forma de montar las tuberías tienen un efecto importante en el funcionamiento de la bomba. Debe tomarse cuidadosas consideraciones en la sumergencia de la succión, diámetros de las tuberías de succión y de descarga, y de los soportes o anclajes de las mismas.

Figura 7. Recomendaciones para el montaje de una bomba centrífuga horizontal

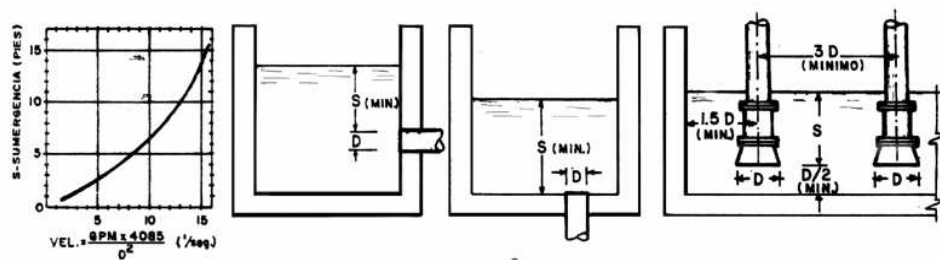


PREVENCIÓN CONTRA LA ENTRADA DE AIRE A LA TUBERÍA DE SUCCIÓN

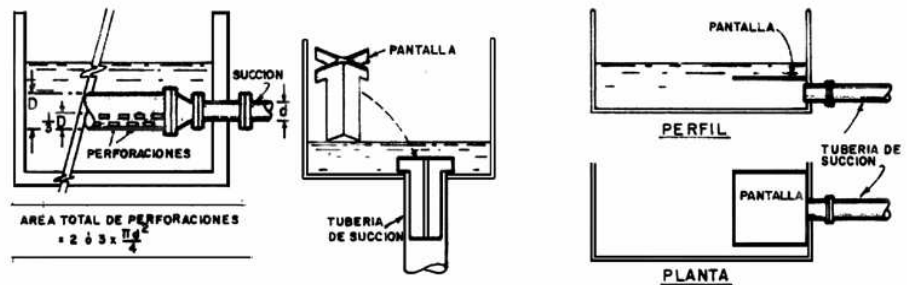


PREVENCIÓN CONTRA LA FORMACIÓN DE BOLSAS DE AIRE EN LA TUBERÍA DE SUCCIÓN (CORRECTO ORDENAMIENTO DE LOS DISTINTOS ACCESORIOS)

3.



Nota: TODAS LAS DIMENSIONES SON LAS MINIMAS RECOMENDABLES.



PREVENCIÓN CONTRA LA FORMACIÓN DE REMOLINOS

FIGURA 13

Fuente: Joselino Chang Lian. Consideraciones sobre montaje, operación y

3. BOMBA SUMERGIBLE PARA AGUA (PROFUNDIDAD)

3.1 Introducción

La explotación del agua subterránea exige la utilización de equipos especiales de bombeo, debido esencialmente a dos razones:

- El tamaño reducido de los pozos (usualmente entre 4 y 16 pulgadas de diámetro) no permite albergar una bomba del tipo convencional; y
- El nivel del agua dentro del pozo con respecto a la superficie supera ampliamente, en la mayoría de los casos, la máxima altura estática de succión permisible (máximo teórico 10.33 metros).

Ha sido necesario diseñar un tipo especial de bomba para instalarla dentro de los pozos y que consiste fundamentalmente en un grupo de impulsores de diámetro reducido montados en serie y acoplados a un mismo eje por medio del cual se transmite la potencia del motor. Todo el conjunto encerrado por una tubería que sirve de conducto del agua.

3.2 Tipos

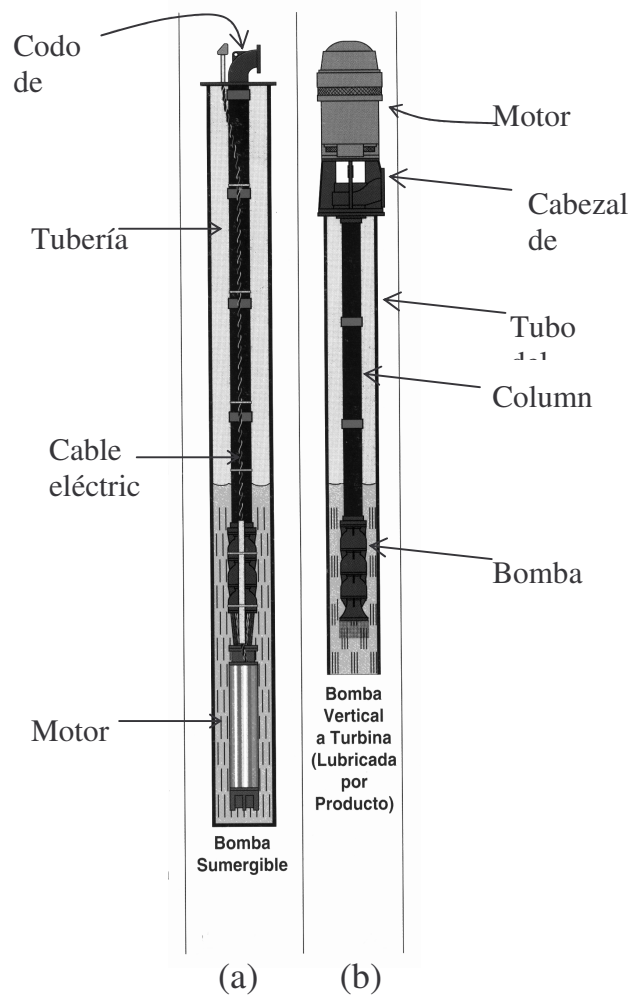
3.2.1 Tipos de turbina normal

De manera general esta bomba consta de:

- El motor eléctrico con el cabezal y engranaje (este último, sólo si es necesario),
- La columna, la cual, comprende el eje de transmisión con sus cojinetes y tubo de conducción,
- La bomba, o juego de tazones e impulsores, y
- El tubo de succión y coladera.

La figura 8 muestra el aspecto de este tipo de bomba.

Figura 8. Equipos de bombeo para pozo profundo



Fuente: Vertical turbine & submersible pumps, American

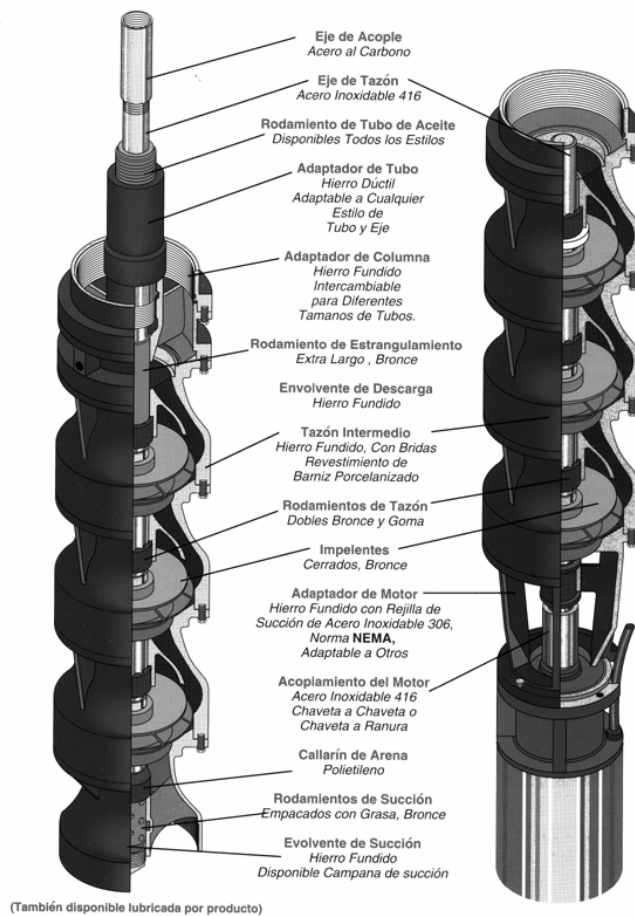
Las partes principales de este equipo de bombeo son:

- El motor eléctrico generalmente es de eje vertical con flecha hueca, a través de la cual se realiza el acople con el eje de la bomba. Cuando se requiere para la bomba una velocidad diferente a la disponible por los motores eléctricos, es necesario un engranaje de ángulo recto para transmitir la potencia. En este caso el motor eléctrico es de eje horizontal.
- El cabezal forma la base de apoyo para el conjunto de la bomba. Descansa sobre un cimiento de concreto construido sobre el tubo forro del pozo. Por su parte superior se apoya el motor eléctrico o el cabezal de engranes, según el caso; en su parte inferior, lleva la conexión para el tubo de la columna (vertical), y a un extremo va acoplada la tubería de conducción (horizontal); en su parte central, posee un sello (estopero) entre el tubo protector y la flecha o eje.
- La columna lubricada por agua es la más frecuente en sistemas de bombeo, aunque existe también, la columna lubricada por aceite, por lo cual, describiremos únicamente la primera. Está constituida por el tubo vertical por el cual se conduce el agua, en cuyo interior se encuentra alojado el eje de transmisión de potencia hacia la bomba. Este eje es mantenido en su centro por una serie de bujes de goma especial (arañas) instalados cada cierta distancia, los cuales son lubricados por el mismo fluido bombeado. Debido a la eventual presencia de arena en el agua, para disminuir el desgaste del eje en los puntos de contacto con los bujes se aplica un manguito de acero inoxidable muy duro.

3.2.2 Tipo de turbina vertical

Este tipo de bomba (figura 9) lleva el motor acoplado en su parte inferior y en consecuencia permanecen sumergidos juntos dentro del agua que se bombea, tal como lo muestra la figura. El uso de este tipo de bomba presenta inconvenientes con respecto al tamaño reducido que se tiene para montar conjuntamente a la bomba y al motor con el cable de alimentación de este último y a la necesidad de extremar las condiciones de protección por la permeabilidad al agua. No obstante este tipo de equipo tiene grandes ventajas con respecto a la bomba con motor en la superficie.

Figura 9. Bombas para pozo profundo



Fuente: Vertical turbine & submersible pumps.

Los fundamentos descritos para la bomba centrífuga horizontal en cuanto a la succión, son también válidos para el caso de las bombas para pozo profundo; sin embargo, en estas últimas, la única variable con la que generalmente se puede jugar para prevenir la cavitación o formación de vórtices (entrada de aire en la succión), es la altura estática de succión, es decir, la sumergimiento de la bomba.

Una situación especial ocurre en el caso de las bombas con motor sumergible. Debido a que el enfriamiento del motor es realizado por el mismo flujo bombeado, en algunos casos es necesario colocarle al motor un tubo a manera de camisa, desde la parte superior de la coladera de succión de la bomba hasta la parte inferior del motor, con el objeto de asegurar que la totalidad del flujo succionado por la bomba, enfríe el cuerpo del motor. La instalación de este tubo en la succión, en algunos casos deberá evaluarse como fricción adicional, pues, puede necesitar la bomba mayor sumergencia, para evitar efectos indeseables. Generalmente el fabricante proporciona las curvas de sumergimiento y de $(NPSH)_R$ contra caudal, por etapa, a una velocidad de operación especificada.

3.3 Tipos de accionamientos

3.3.1 Por motor de combustión

Existen aplicaciones donde la fuente de energía mecánica para ser convertida en energía hidráulica, es un grupo motor de combustión interna sea por gasolina o por diesel.

Los accionamientos de este tipo son a gasolina para potencias bajas hasta el orden de 10 HP y para potencias superiores se utilizan motores diesel.

Este tipo de accionamientos tiene su aplicación preponderantemente en los sistemas de riego, donde la fuente de energía mecánica se acopla al equipo de bombeo por medio de una caja de transmisión especial denominada cardán.

3.3.2 Por motor eléctrico

El motor eléctrico usado frecuentemente en sistemas de bombeo y que es el caso que nos ocupa, es un motor trifásico de inducción tipo jaula de ardilla clase B.

En lugares donde se dispone de energía eléctrica sea por una red de distribución local, sea monofásica o trifásica, o bien, por un generador de energía (planta generadora), se hace posible accionar los equipos de bombeo por medio de motores eléctricos.

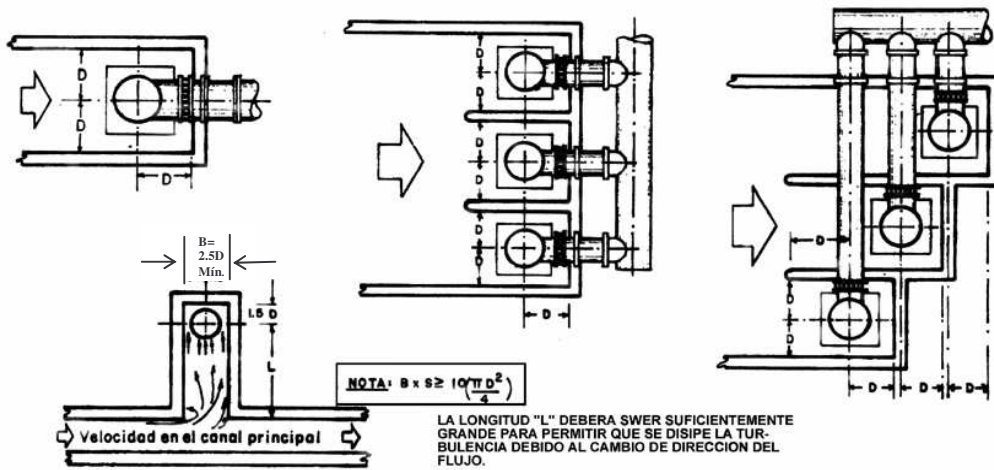
Para el caso del equipo sumergible existen motores monofásicos hasta 15 HP. Mientras que para el caso de sumergibles trifásicos las potencias varían de ½ HP hasta 250 HP.

Los niveles de voltaje pueden ser monofásicos 110 voltios ó 220 voltios y en su defecto trifásicos 230 voltios, 460 voltios ó 575 voltios.

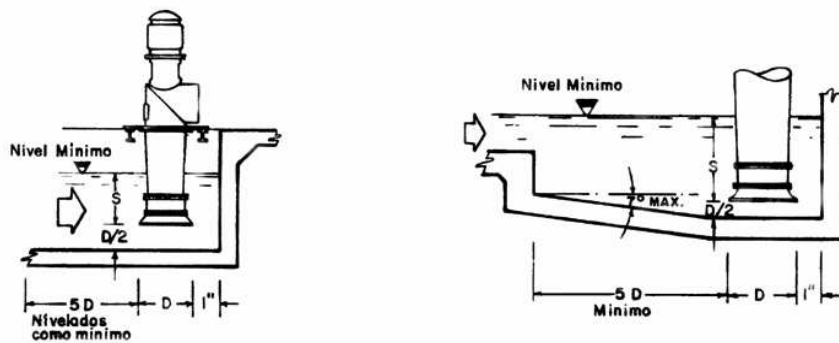
3.4 Esquema de montaje

El montaje e instalación de una bomba para pozo profundo requiere de una grúa y de equipo especial. Nos circunscribiremos a las variantes y detalles de instalación que influyen directamente en la correcta operación de la bomba y motor.

Figura 10. Montaje de una bomba tipo turbina en un tanque a poca profundidad



PLANTAS



PERFILES

NOTA: TODAS LAS DIMENSIONES SON LAS MINIMAS RECOMENDABLES.

RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DEL POZO DE SUCCION

Fuente: Chang Lian, Joselino. Consideraciones sobre montaje, operación y

Las bombas para pozo profundo también pueden instalarse en tanques a poca profundidad. Algunos de los cuidados para su montaje en este caso, para una bomba con motor en la superficie, se muestran en la figura 10.

Discutiremos brevemente los detalles de instalación en pozos profundos, por requerir, en estos, de cuidado especial. Los detalles de tubería y accesorios, en el lado de la descarga, después del codo o cabezal de descarga (según el tipo de bomba), son similares a los descritos para la bomba centrífuga horizontal. No así para el lado de la succión, en donde los accesorios serán de acuerdo al tipo de bomba. No se requiere de dispositivos de cebado, pues los dos tipos de bombas se encuentran sumergidos en el agua.

- Electrodo. Su función es evitar que la bomba trabaje con un nivel de sumergimiento menor al requerido por la bomba, o, peor aún, que trabaje en seco. En ciertas condiciones de bombeo, o por el envejecimiento del pozo, es posible que el descenso del nivel dinámico llegue a un punto en el cual el nivel de sumergimiento ya no es suficiente y sea necesario suspender el bombeo. Los electrodos son los sensores del Guardanivel, el cual, es un elemento de control del motor eléctrico. Se instala durante el proceso de montaje de la columna, un par de electrodos separados verticalmente una distancia conveniente. El electrodo alto se instala a unos cuantos pies por debajo del nivel dinámico o máximo descenso del nivel al bombear un caudal Q deseado, según la curva de abatimiento del pozo. El electrodo bajo se instala a unos cuantos pies por encima del nivel mínimo de sumergimiento requerido por la bomba.
- Ajuste del juego axial de los impulsores. Después de haber instalado la bomba, columna y cabezal, se procederá a montar el motor eléctrico (o engranaje), el cual posee en su parte superior el cojinete de carga.

El eje de transmisión de la bomba, se prolonga a través del eje hueco del motor hacia el cojinete de carga, el cual, soportará el peso del eje e impulsores, y al estar operando la bomba, soportará adicionalmente el empuje hidráulico.

Los impulsores de la bomba están diseñados con un juego axial relativamente grande, dentro de los tazones. El montaje de los impulsores en el eje y tazones, es una operación importante y delicada, y deberá asegurarse que los juegos axiales, sean iguales para todos los impulsores.

Al ser instalada la bomba, el conjunto de impulsores descansa en definitiva en el eje de transmisión, el cual, descansa a su vez sobre el cojinete de carga por medio de una tuerca y un sistema de seguros que permiten el adecuado ajuste axial de los impulsores. Al operar la bomba se produce un desplazamiento relativo entre impulsores y tazones, debido a la fuerza hidráulica por la diferencia de presiones entre el disco del impulsor y el ojo de succión, que fuerza a los impulsores como émbolos hacia abajo, aumentando la tensión sobre el eje, ocasionando mayor estiramiento en el mismo.

El ajuste de los impulsores dentro de los tazones, por medio de la tuerca mencionada, debe ser tal que dichos impulsores tomen su posición recomendada durante el funcionamiento de la bomba y no cuando esté parada. El movimiento relativo dentro de los impulsores en operación, puede llegar a varios milímetros. Un ajuste muy hacia abajo puede ocasionar que durante el funcionamiento el estiramiento del eje ocasione que los impulsores se arrastren en la parte inferior de los tazones. Un ajuste muy hacia arriba, puede ocasionar arrastre de los impulsores con la parte superior de los tazones, a baja velocidad de la bomba, cuando el empuje hidráulico es bajo; es decir, durante el arranque y paro de la bomba.

- Protección contra giro en reversa al suspender el bombeo. Debido a que la columna no está provista de un cheque, al suspender el bombeo, el fluido de la columna tenderá a regresarse hacia el pozo, forzando a la bomba y motor a girar en reversa. Para evitar esto, el motor viene previsto con un sistema de trinquete, que permite el giro del motor en un solo sentido. Este sistema se instala antes de realizar el ajuste de los impulsores.

- Sistema de prelubricación. Antes de operar la bomba gran parte de la columna se encuentra seca. Por tanto, si la columna es relativamente larga, previo al arranque es necesario escurrir agua por el eje y bujes de la columna, pues como se indicó con anterioridad, estos son lubricados por el mismo flujo bombeado. Para ello se instala una línea auxiliar de prelubricación conectada a un pequeño tanque elevado que se conserva lleno para este fin. Si la de descarga se mantiene llena después de suspender el bombeo, debido al cheque, la prelubricación puede obtenerse instalando un "by-pass" (tubo de pequeño diámetro) desde el extremo con carga del cheque hasta el cabezal de descarga.

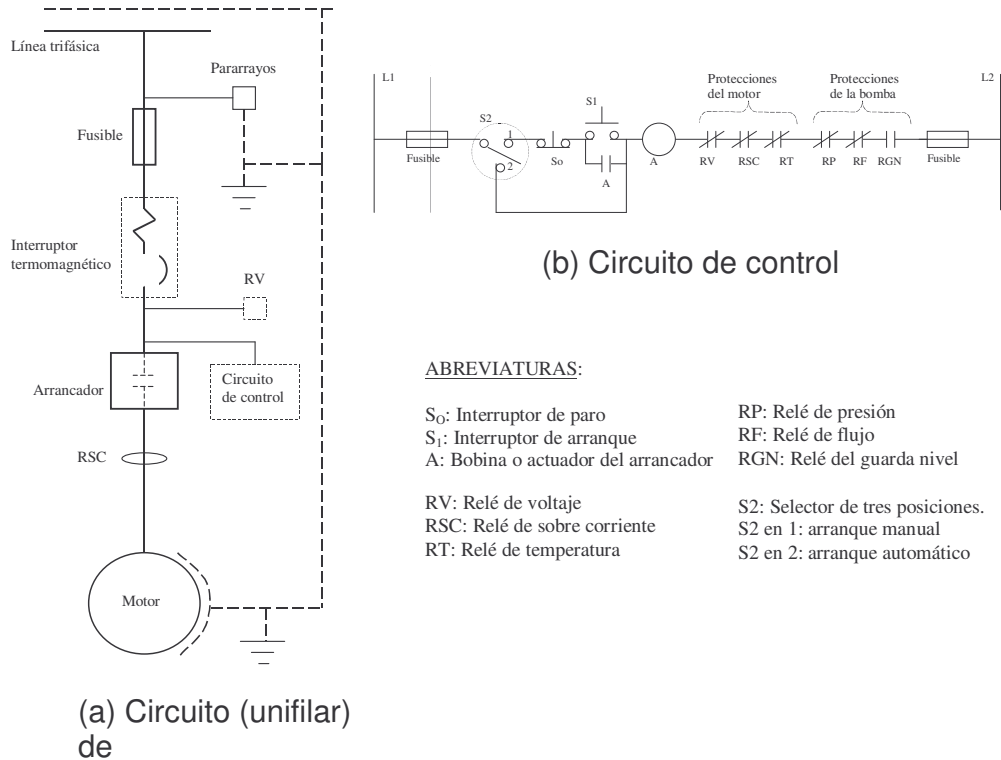
- Válvula de lavado. Al iniciar el bombeo por primera vez, o después de estar suspendido determinado tiempo, en algunos pozos es posible que el agua presente turbiedad, por material (arena, lodo, óxido, etc.) que se sedimenta en la profundidad del pozo. Como no es deseable que esta suciedad ingrese a la red de descarga, debe instalarse en la misma, una válvula en derivación, antes de la válvula de descarga hacia la red. De este modo se podrá "lavar" el pozo el tiempo necesario, abriendo la válvula de lavado y cerrando la válvula hacia la red.

4 PANELES DE CONTROL PARA SISTEMAS DE BOMBEO

4.1 Diagramas unifilares

El gobierno eléctrico de un motor se divide fundamentalmente en dos circuitos: circuito de fuerza o potencia y circuito de mando o de control. Puesto que la operación de la bomba depende del impulso del motor, la bomba es controlada y protegida gobernando al motor.

Figura 11. Diagrama elemental para el control de un motor, en un Sistema de bombeo



Fuente: elaboración propia

4.2 Capacidad eléctrica de la fuente de energía

4.2.1 Dimensionado del generador

Existen dos tipos de generadores eléctricos los externamente regulados y los internamente regulados, la mayoría son externamente regulados y tienen montado un regulador de voltaje que monitorea la tensión de salida. Cuando la caída de tensión en el motor durante el arranque aumenta el regulador incrementa la salida de voltaje del generador.

Los generadores se deben dimensionar para que entreguen como mínimo 65% del voltaje nominal del motor durante el arranque, para asegurar el torque de arranque adecuado.

Para determinar la potencia activa en kilowatt (kW) de un generador eléctrico para accionar o energizar un motor de potencia activa dada en caballos de fuerza (HP), se procede inicialmente a convertir los HP a kW utilizando el factor de conversión 0.746. Luego, se procede a dividir la potencia del motor en kW dentro de 0.60 para obtener así la potencia activa mínima del generador para energizar dicho motor.

Por ejemplo, para un motor de 40 HP se requiere un generador de una potencia determinada por: $(40 \text{ HP} \times 0.746) / 0.6 = 49.73 \text{ kW}$, que en la practica viene a ser 50 kW.

4.2.2 Dimensionado del transformador

Existen dos tipos de transformadores eléctricos los bañados en aceite y los tipos secos, la mayoría son bañados en aceite.

Los transformadores se deben dimensionar para que entreguen como mínimo 62% del voltaje nominal del motor durante el arranque, para asegurar el torque de arranque adecuado y evitar caídas de tensión en el motor.

Para determinar la potencia aparente en kilovoltio amperios (kVA) de un transformador eléctrico para accionar o energizar un motor de potencia activa dada en caballos de fuerza (HP), se procede inicialmente a convertir los HP a kW utilizando el factor de conversión 0.746. Luego, se procede a dividir la potencia del motor en kW dentro de 0.62 para obtener así la potencia aparente mínima del transformador para energizar dicho motor.

Por ejemplo, para un motor de 40 HP se requiere un transformador de una potencia determinada por: $(40 \text{ HP} \times 0.746) / 0.62 = 48.12 \text{ kVA}$, que en la practica viene a ser 50 kVA, que podría cubrirse con tres transformadores convencionales de 15 kVA cada uno (por la tolerancia de operación del transformador) o sobredimensionar el banco de transformación con tres transformadores de 20 kVA ó 25 kVA cada uno, según la disponibilidad en el mercado.

4.3 Componentes del panel de control

4.3.1 Gabinete metálico

Para instalar los controles eléctricos del sistema de fuerza y mando (automatización) de un motor eléctrico, se hace necesario el uso de gabinetes metálicos o tableros eléctricos.

Estos son dimensionados de acuerdo a la potencia y al nivel de voltaje del motor que se instalara.

En el caso de los sistemas trifásicos existe en el mercado una gran variedad de gabinetes entre los cuales podemos mencionar los más utilizados acorde a la nomenclatura Siemens.

Éstos son:

T1 con dimensiones de 8" X 12" X 20"

T2 con dimensiones de 8" X 16" X 24"

T3 con dimensiones de 8" X 20" X 27"

4.3.2 Interruptor electromagnético

Protege contra corrientes de sobre carga mayores que el relé de corriente, incluso contra cortocircuitos. Esto es, protege los conductores de la instalación eléctrica y a los componentes del panel de control.

4.3.3 Arrancadores

4.3.3.1 Electromagnético

Los arrancadores convencionales (electromecánicos), han cumplido y siguen cumpliendo una función importante para el arranque de los motores de inducción, cuya velocidad en régimen permanente permanece fija.

Un arrancador electromagnético es la unión de un contactor (que es un interruptor a distancia gobernado por la acción de un electroimán) con un protector térmico de sobrecarga llamado comúnmente relé bimetálico.

Existe una gran gama de arrancadores electromagnéticos, que son usados para el arranque de motores de potencias que van desde fracciones de caballo de fuerza, hasta cientos de caballos, aunque se tiene la limitante, que entre más potente es el motor al momento del arranque la factura eléctrica se ve incrementada por el factor de demanda.

Por tal motivo, se hace necesario el uso de arrancadores a tensión reducida, que en muchos casos siempre tienen un arrancador convencional insertado. Los diferentes tipos de arrancadores a tensión reducida (estrella-delta, autotransformador, etc.), satisfacen las necesidades para motores grandes, disminuyendo la corriente de arranque y logrando un arranque relativamente suave; pero, no son útiles cuando el énfasis es regular la velocidad del motor en régimen permanente, sin modificar el número de polos.

4.3.3.2 Electrónico

La aplicación de la electrónica en la relevación de potencia, ha permitido la sustitución de los arrancadores basados en relés por componentes semiconductores con notables ventajas.

Esto ha dado origen a los arrancadores de estado sólido. Con éstos es posible arrancar el motor (y suspender su operación) a frecuencia constante y con voltaje reducido en rampa, obteniendo una aceleración más suave que con los arrancadores electromecánicos, tal como se describió con anterioridad. Sin embargo, con este tipo de arrancador, hemos visto que, no es posible controlar la velocidad en motores grandes en régimen permanente.

Otro tipo de arrancador o controlador de estado sólido, con el cual sí es posible controlar la velocidad del motor de inducción en régimen permanente, y que es el punto de nuestro interés, es el variador de frecuencia.

4.3.4 Protecciones

Puesto que su función es asegurar que la bomba trabaje en condiciones apropiadas, los siguientes elementos tienen retroalimentación directa hacia el circuito de mando o de control del motor.

4.3.4.1 Protección de presión

Su función es controlar que la bomba trabaje dentro de un rango de baja y/o alta presión, por las circunstancias que ya hemos comentado. El circuito de control del motor, un relé de presión, cuyo actuador, generalmente consiste en un interruptor de presión conectado a la línea de descarga de la bomba. Este interruptor de presión es frecuente en el suministro de agua a domicilios o a un número pequeño de consumidores, a través de un sistema hidroneumático. Para el caso que nos ocupa, la instalación de dicho interruptor, cuando la bomba descarga hacia un sistema de fricción variable puede evitar que la bomba trabaje a alta presión.

Por supuesto, para este caso, con el objeto de evitar los rearranques intermitentes, se debe incluir en el circuito de control del motor un sistema de retardo para cada rearranque del motor cuya suspensión previa haya sido por alta presión.

Por la finalidad de estos apuntes, se sugiere un transductor de presión, con cuya conversión en voltaje o corriente y retroalimentada al circuito de control del motor, es posible regular la velocidad de la bomba y por tanto la presión de bombeo.

4.3.4.2 Protección de flujo

Su función es controlar que la bomba trabaje dentro de un rango de bajo y/o alto caudal. El relé de flujo, en realidad no es común en los sistemas de bombeo. Sin embargo, la instalación de un interruptor de flujo en la descarga de una bomba, cuyo bombeo es hacia un tanque elevado (es decir carga hidráulica constante), puede ser de utilidad cuando se presenta una fuga ocasionada por una ruptura en la línea, en puntos cercanos de la bomba (recordemos que el efecto de esto, es ocasionar un alto caudal de bombeo). Por supuesto, para evitar los re arranques intermitentes, se deben tomar las consideraciones de retardo de tiempo, similares al caso anterior.

Igualmente al caso anterior, se sugiere un transductor de flujo, con cuya conversión en voltaje o corriente y retroalimentada al circuito de control del motor, es posible regular la velocidad de la bomba y por tanto el flujo bombeado, tal como se verá en nuestro ejemplo propuesto más adelante.

4.3.4.3 Protección por bajo y alto voltaje

Relé de voltaje: protege al motor contra bajo o alto voltaje, desbalance excesivo ente líneas, y pérdida de una fase. Es decir, al ocurrir uno u otro de los eventos recién mencionados, el aparato procede a efectuar la operación de desconexión del circuito de mando, que es el que gobierna el circuito de fuerza que acciona el motor eléctrico.

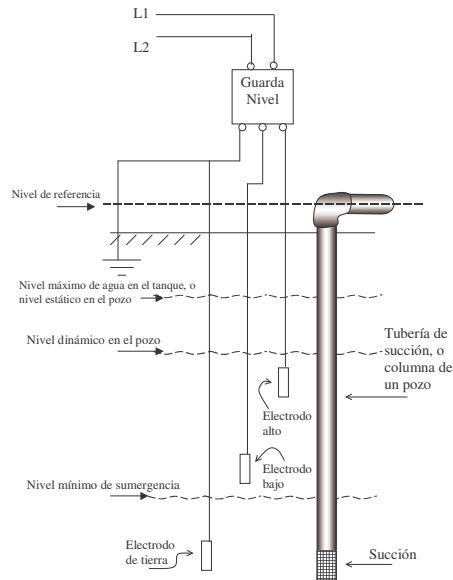
4.3.4.4 Protección contra bombeo en seco

Su función es asegurar que la bomba no trabaje abajo de la sumergencia mínima requerida, o peor aún, que trabaje en seco, la operación del guardanivel, en esencia, es la siguiente: después de un buen tiempo de estar suspendido el bombeo, el nivel del agua estará arriba del electrodo alto. Esto hace que la conductividad del agua (por los minerales en suspensión) "cortocircuite" los electrodos, los cuales accionarán un relé en el guardanivel, cuya incorporación en el circuito de control del motor, permitirá que la bomba pueda ponerse en marcha.

Al estar bombeando, el caudal extraído al tanque o pozo, hará que el nivel del agua descienda. Si por alguna circunstancia, el descenso del agua continúa, y se descubre el electrodo alto, pero el nivel del agua aún está arriba del electrodo bajo, la corriente en el agua seguirá fluyendo a través de los electrodos bajo y de tierra, y la operación del motor continuará y, por tanto, el bombeo también.

Si el abatimiento del nivel de la fuente de agua continúa, a tal punto que se descubre el electrodo bajo (cuya altura es ligeramente superior al nivel mínimo de sumergencia requerido por la bomba a un caudal dado), la corriente ya no podrá fluir por el agua, y el relé del guardanivel ordenará la suspensión de la operación del motor y, por tanto, del bombeo.

Figura 12. Diagrama de conexión básico de un guardanivel



Fuente: elaboración propia

Con la suspensión del bombeo, la fuente de agua inicia su recuperación. Si el panel de control del motor está en el modo de re arranque automático, el bombeo iniciará nuevamente al recuperarse la fuente a un cierto nivel. Si durante su recuperación, el agua cubre al electrodo bajo, pero aún no al electrodo alto, el bombeo aún no inicia, sino hasta que el agua cubra también al electrodo alto. Al reiniciar el bombeo, dependiendo de las circunstancias hidráulicas, el ciclo de abatimiento podría repetirse.

Esta forma de operación del guardanivel, en pozos cuyo envejecimiento ocasiona abatimientos frecuentes, evita los re arranques del motor en tiempos muy cortos, que tanto daño le hacen.

Es conveniente tener especial cuidado en la identificación de los electrodos, especialmente en los pozos profundos; pues, en muchos casos los re arranques intermitentes repetidos del motor son ocasionados por una mala identificación de los electrodos, y no por abatimientos frecuentes.

En la actualidad, para efectos de lograr la desconexión automática de una línea de conducción desde una fuente a un reservorio para evitar rebalse o bien para evitar el bombeo en seco de los equipos centrífugos o sumergibles en tanques, se han convertido en comunes los interruptores de flote con contrapeso.

Estos dispositivos de conexión y desconexión antes usaban mercurio como elemento de conexión y desconexión, ahora tienen como elemento interruptor un sistema que se acciona por la acción del peso de una esfera metálica sólida, parecida a las de los rodamientos o cojinetes de bolas, que según el nivel del agua y la función que se necesite, es decir protección contra bombeo en seco o bien protección contra el rebalse, se puede cablear o conectar según la aplicación.

Los interruptores de flote son bastante más económicos que los guardaniveles con electrodos y mucho más fáciles de instalar o recambiar, tienen la limitante de no poder ser usados en los pozos mecánicos por el recorrido pendular de conexión y desconexión que es necesario, lo que los limita a ser utilizados solamente en los pozos manuales o en reservorios.

4.3.4.5 Protección contra picos de voltaje

Su objeto es proteger al motor contra la inducción de voltajes mayores a los nominales de operación, provenientes de descargas electro atmosféricas o bien por fenómenos de desbalance o baja carga en el sistema local de distribución de energía eléctrica. Estos dispositivos están diseñados para detectar estos altos niveles de voltaje y proteger al motor eléctrico. Normalmente se les conoce como supresores de picos, ya que es su principal función dentro de un circuito de automatización.

4.3.4.6 Protección contra arranque intermitente

Los sistemas de bombeo deben operar con la mayor continuidad posible es decir, se debe evitar paros y arranques repentinos provocados por alguna falla por sobre o bajo voltaje, falta de fase, presión, sobre temperatura etc. Para evitar el rearme o energización inmediata después de ocurrida la falla, se hace necesario el uso de relés de demora, que normalmente son dispositivos de mando para provocar un retardo en el sistema de mando antes de reactivar el sistema.

4.3.5 Mando y señalización

Un circuito de automatización se divide en dos partes: circuito de fuerza y circuito de mando. Este primero, es la parte que se cablea con la idea que circule por este la corriente de mayor intensidad, es decir con los cables de mayor calibre o más gruesos, para la energización del motor.

El circuito de mando, por el contrario, se cablea con los cables de menor calibre, para lograr tener una separación entre las corrientes grandes y bajas que puedan figurar en el sistema y tener de alguna manera, clasificados los componentes del sistema de automatización y a la vez tensiones de contacto permisibles para el personal operativo. Como una medida de seguridad y de identificación de los diversos circuitos dentro del panel de control, se tienen normas de colores de los cables para mando y así saber en el acto el nivel de voltaje de mando y el recorrido de estas corrientes bajas.

La separación entre uno y otro circuito se puede lograr por medio de la denominada separación galvánica, por medio de transformadores especiales, que pueden ser los conocidos como transformadores por acople óptico (o simplemente optocoplas) o los conocidos transformadores de mando, que se utilizan para cambiar los niveles de voltaje de un valor alto a otro más bajo, con el objeto de que los equipos de mando sean menos robustos y los niveles de voltaje no sean peligrosos para el humano. Por ejemplo si el circuito de fuerza es para 460 Volt, no necesariamente el circuito de mando tendrá ese nivel de voltaje, por lo que el uso del transformador de mando es necesario, para lograr tener niveles de voltaje de 110 Volt hasta 24 Volt.

Para poder activar y desactivar un sistema de automatización eléctrica, se hace necesario el uso de diversos accesorios para mando, es decir, existe una gran variedad de dispositivos para el establecimiento o interrupción del paso de corriente en un circuito eléctrico, como lo son interruptores o pulsadores.

El uso de pulsadores es bastante frecuente, por la versatilidad y la flexibilidad que proporcionan por la conmutación o por los bloqueos de una u otra función en un circuito de mando.

Con el objeto de señalar al usuario una u otra función durante la operación, se utilizan los componentes denominados luces piloto, que se instalan con diferentes colores, para señalar una u otra función. Por ejemplo, el color verde significa marcha o funcionamiento, mientras que el color rojo significa parada o falla.

Los dispositivos de mando y señalización, normalmente son instalados en la puerta del gabinete metálico del panel de control. Por ejemplo, las luces piloto, que pueden indicar marcha (color verde), paro (amarillo) o falla (rojo), son instaladas con herramientas especiales, que son mordazas cortadoras, denominadas en la práctica ponchadores, por la influencia del inglés en nuestro medio.

Algunos paneles de control tienen también interruptores de seguridad tipo hongo, para una más fácil interrupción de la operación del equipo a la hora de alguna contingencia o situación de emergencia.

4.3.6 Accesorios para empalme y conexiones

Dentro del panel de control se hacen diversas conexiones, tanto las internas del gabinete metálico como las que interconectan hacia otros componentes de la instalación eléctrica del sistema.

Las conexiones internas se hacen por medio de cables que se interconectan por medio de terminales a los bornes o tornillos de los diversos componentes del panel de control, es decir, interruptor termo magnético, arrancador, protector, etc.

Las conexiones hacia elementos externos del panel de control, se realizan por medio de empalmes mecánicos que también son conocidos como borneras, que son componentes especiales para apriete, sujeción e interconexión de los diversos elementos del sistema de mando o inclusive el de fuerza.

En el caso especial de una instalación de un equipo sumergible de bombeo, se requiere de un empalme o unión especial entre los cables del motor (conector especial llamado coleta del motor) y el cable sumergible que será instalado desde el punto de instalación del equipo sumergible y la boca del pozo (brocal). Para interconectar los componentes sumergibles, se utilizan materiales especiales para empalme, como uniones de entallar, que son cilindros metálicos con diámetro acorde al calibre del cable, que luego de introducirse los extremos de los cables son oprimidas con un punzón, para luego ser revestidas con cinta de aislar que a su vez es sumergible.

En casos especiales, se utilizan empalmes mecánicos especiales revestidos con resinas epóxicas para lograr un mejor sello o aislamiento, pero, su costo es alto y además a cada cierto tiempo se hace necesario deshacer dicho empalme, por la vida útil del motor.

4.4 Conductores eléctricos

4.4.1 Convencionales

Son los materiales utilizados específicamente en las aplicaciones de transporte y distribución de energía eléctrica. Por su forma física pueden ser alambre (sólidos de un hilo) o cable (muchos alambres). Ambos tipos pueden ser utilizados en aplicación a la intemperie o subterránea, es decir con forro o sin forro, que es un material aislante diseñado especialmente para la aplicación.

Es decir, si será aislamiento termoplástico resistente a la humedad o simplemente termoplástico aislante, para evitar el contacto de personas, animales o demás componentes de la instalación.

Los materiales termoplásticos utilizados como forros aislantes en los conductores eléctricos son diversos, entre los que podemos mencionar, por ejemplo, el cloruro de polivinilo (más conocido como *PVC*), el polietileno, el poliamida, el poliuretano.

En los sistemas de transmisión y distribución de energía, se utilizan principalmente conductores de aluminio sin forro, ya que estos sistemas se diseñan de tal forma que existe la coordinación de aislamiento respectiva, con las distancias o libranzas respectivas y los materiales aisladores de niveles de voltaje adecuados.

Los fabricantes de conductores imprimen normalmente en el forro del conductor, las características del mismo, es decir, las siglas del material del forro, la temperatura que soporta, el calibre o grueso del conductor y el máximo nivel de voltaje que soporta.

Por ejemplo, se tienen conductores con forro *THW*, que es un termoplástico impermeable, solamente resiste la humedad, mas no a ser directamente sumergido.

4.4.2 Sumergibles

Como el nombre lo indica, los conductores eléctricos sumergibles, son los que son fabricados específicamente para operar en condiciones de temperatura y sumergencia total.

Es decir, totalmente inmersos en agua o en algún fluido para el que está diseñado el forro aislante sin permitir una fuga de voltaje o tensión de contacto.

En el año 1870, se utilizaron conductores eléctricos sumergibles, que estaban instalados dentro del mar, con distancias del orden de 11,000 kilómetros, entre Londres y Calcuta, pasando por Prusia, Rusia y Persia atravesando el golfo pérsico. Para el año 1880 se tenían distribuidos en 585 líneas subatlánticas, cerca de 69,500 millas marinas, unos 128,930 km. de cable sumergible.

En la aplicación para energización de motores eléctricos sumergibles, sea dentro de un reservorio, pozo manual o pozo mecánico, el dimensionado del cable se hace con ayuda de tablas o bien por la aplicación de ecuaciones que provienen de las leyes de Maxwell, como por ejemplo, sabiendo de la ley de Ohm que $V = I \cdot R = W / q$ y usando la ecuación:

$$J = \sigma E$$

Donde J es la densidad de corriente en Amperio por metro cuadrado (A / m^2),

σ (sigma) la conductividad eléctrica en metro sobre Ohm por milímetro cuadrado ($m / \Omega \cdot mm^2$) y

E el campo eléctrico o gradiente de potencial en Voltio por metro (V / m)

Se puede deducir la ecuación de la resistencia eléctrica:

$$R = L / (\sigma \cdot A)$$

Donde R es la resistencia eléctrica del conductor en Ohm (Ω), L es la longitud efectiva del conductor en metros (m), σ la conductividad eléctrica en metro sobre Ohm por milímetro cuadrado ($m / \Omega \cdot mm^2$) y A es el área del conductor, es decir, la sección transversal del conductor, normalmente asumida como círculo, medida en milímetros cuadrados (mm^2). Tomar en cuenta que los valores experimentales de σ son $56 (m / \Omega \cdot mm^2)$ para el cobre y $35 (m / \Omega \cdot mm^2)$ para el aluminio.

Partiendo siempre de la ley de Ohm y haciendo un análisis de corriente trifásica, se tiene la ecuación para el cálculo de la caída de tensión en una instalación trifásica:

$$U_v = I \cdot R \cdot \cos(\Phi) \cdot \sqrt{3} = (I \cdot L \cdot \cos(\Phi) \cdot \sqrt{3}) / (\sigma \cdot A)$$

El factor de potencia $\cos(\Phi)$ es el factor que nos indica que parte de potencia aparente se convierte en potencia activa y debe ser lo más cercano a la unidad, aunque normalmente varía de 0.85 a 0.90. En los sistemas trifásicos interviene el factor de fase $\sqrt{3} = 1.732$.

El factor U_v corresponde al porcentaje permisible de caída de voltaje, que normalmente varía de 3% a 5% del voltaje nominal del sistema. De la ecuación anterior se puede obtener el área del conductor que se requiere para optimizar una caída al porcentaje seleccionado del voltaje nominal de fase en la red. Al efectuar el cálculo de A , se obtiene el área en mm^2 de la sección transversal del conductor, lo que es común en sistema europeo. Para el sistema americano, se utiliza el calibre del conductor como una medida del área, por tal motivo se hace necesario el uso de una tabla de conversión de calibre *AWG* a milímetros cuadrados.

5 ANÁLISIS ECONÓMICO PARA AMBOS SISTEMAS

5.1 Sistema integral de bombeo

5.1.1. Extracción de agua de un pozo profundo a una cisterna intermedia

Para realizar el diseño de un equipo sumergible de bombeo dentro de un pozo mecánico, se requiere conocer las características del sistema, es decir, los datos base del diseño, como son el diámetro, la profundidad, los niveles, ubicación de rejillas y producción del pozo. Parámetros que son proporcionados al propietario del pozo por la empresa perforadora, para efectos de diseño e implementación del pozo con el equipo de bombeo respectivo.

Los pozos mecánicos tienen dos niveles, un nivel estático, que es el que se mide desde la superficie al espejo de agua, cuando el pozo no es explotado por una bomba o compresor y otro nivel denominado dinámico o de bombeo, que es el que se mide cuando el pozo está siendo explotado. Este último es el que provoca carga a la bomba, de acá su importancia para el diseño de esta.

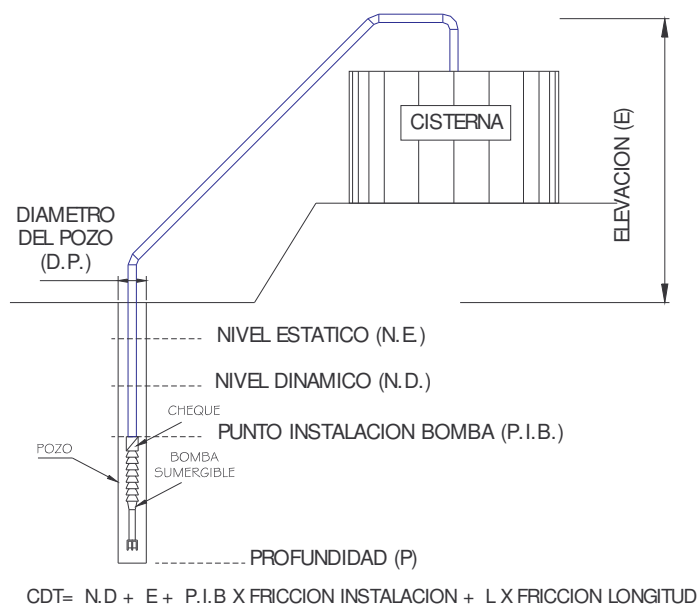
Además, se necesita saber el caudal de bombeo o razón de explotación del pozo, ya que normalmente no se recomienda explotar los acuíferos a una razón cercana a la de la producción del pozo, con el objeto de darle mayor vida útil al pozo, al no sobre explotarlo.

De vital importancia son también las cotas o niveles de la boca o brocal del pozo y del punto de descarga en el cisterna o tanque elevado. La longitud efectiva de tubería de conducción desde el brocal del pozo al punto de descarga en el tanque, con un diámetro óptimo acorde al caudal y a una velocidad promedio que no provoque pérdidas excesivas al sistema, es decir buscar una velocidad que varíe entre los 6 y 8 pies por segundo (pie / s).

El diseño de un equipo sumergible de bombeo está definido por el cálculo del caballaje del motor, basados en la carga dinámica total, mas conocida como CDT y por el caudal de bombeo en galones por minuto (GPM). También se considera la eficiencia hidráulica (Eff) y un factor de compensación, ya que las unidades de medida que se utilizan no son consistentes, la ecuación es:

$$BHP = (CDT \times GPM) / (3,960 \times Eff)$$

Figura 13. Sistema de bombeo sumergible de pozo a cisterna elevada



Fuente: Elaboración propia

La CDT se obtiene de la sumatoria del nivel dinámico más la elevación más fricción de la tubería de descarga dentro del pozo más la fricción de la tubería de descarga entre el brocal del pozo y el tanque o cisterna. Es decir:

$$CDT = ND + E + PIB \times FI + L \times FL$$

Donde: ND es el nivel dinámico del pozo medido en pies.

E es la elevación o diferencia de altura de pozo a tanque, medida en pies.

PIB es el punto de instalación o ubicación de la bomba sumergible dentro del pozo, es decir la longitud de la columna de tubería dentro del pozo (recomendando de 60 a 100 pies bajo ND), también es medido en pies.

FI es el factor de fricción de la tubería de descarga dentro del pozo, es decir la columna, en pies.

L es la longitud efectiva de tubería de conducción del agua desde el brocal del pozo al punto de descarga en el tanque.

FL es el factor de fricción de la tubería de conducción entre brocal de pozo y cisterna, en pies.

Los factores FI y FL se obtienen de tablas especiales, que se basan en la ecuación de Bernouilli y en el método de Hazen y Williams, es importante seleccionar estos factores acorde al material de la tubería, el caudal óptimo y a la velocidad permisible del fluido en la tubería.

Al haber calculado la CDT, se procede a estimar el caballaje del motor a utilizar, teniendo como parámetro de eficiencia promedio el 65% y el caudal de diseño requerido en galones por minuto (GPM).

El criterio de selección de equipo será consolidado al utilizar la curva de rendimiento de la bomba sumergible de alguna marca conocida en el mercado local. Teniendo a la vista en el eje horizontal el caudal y en el eje vertical la CDT.

En la curva del fabricante de la bomba, se puede obtener la potencia o HP que la bomba estará demandando, teniendo así los argumentos para decidir por un motor óptimo para esta aplicación.

El siguiente paso es proceder a elaborar un bosquejo con un listado de los materiales a utilizar en la instalación del equipo sumergible dentro del pozo. Por ejemplo, si el pozo mecánico tiene 10 pulgadas de diámetro, se requiere un sello sanitario de ese diámetro con orificio interno del diámetro de la tubería de descarga que se requiere.

Es decir, usando como velocidad promedio del agua en dicha tubería los 6 pie / s, se tiene que, caudal es el producto del área por velocidad:

$$Q = A \times V = (\pi \times D^2 / 4) \times 6$$

Despejando el diámetro D, se tiene:

$$D = \sqrt{((0.4085 \times Q) / 6)}$$

Donde 0.4085 es el factor de compensación dado que las unidades no son consistentes, es decir el caudal esta en galones por minuto, la velocidad en pies por segundo y el diámetro se dimensiona en pulgadas.

Se tiene que realizar el diseño del equipo de bombeo para uno de los pozos mecánicos en la colonia Prados de Villa Hermosa, municipio de San Miguel Petapa, departamento de Guatemala. Los datos base del sistema son:

Profundidad total del pozo: 700pies , diámetro del pozo: 8 pulgadas , nivel estático: 80 pies , nivel dinámico: 333 pies , producción: 517 GPM , cota de la boca del pozo: 1,263 metros (4,143 pies) sobre el nivel del mar, la cota de la cisterna para descarga es la misma del brocal, aunque se dispone en el proyecto otra cisterna en la cota 1,308 metros (4,290 pies) es decir a una elevación de 147 pies y dista en línea recta a 1,200 metros (3,936 pies). La razón de explotación del pozo será de 500 GPM.

El punto de ubicación de la bomba es seleccionado por lo general, entre 60 y 100 pies debajo del nivel dinámico o de bombeo, que en este caso es de 333 pies, quedando entonces el PIB a 433 pies, siendo conservadores, ya que la explotación del pozo será cercana a la producción del mismo. En la práctica, los tubos de la columna vienen en longitudes de fábrica de 20 pies, lo que nos implica tomar la longitud de 440 pies, o sea, 22 tubos con diámetro de 6 pulgadas, ya que:

$$D = \sqrt{((0.4085 \times 500) / 6)} = 5.83 \text{ pulgadas}$$

Calculando la CDT para bombear 500 GPM desde lo profundo del pozo hasta la cisterna más elevada y aplicando la ecuación de la CDT, se tendría:

$$\text{CDT} = (333) + (147) + (440) \times 0.0319 + 3,936 \times 0.0136 = 547.57 \text{ pies.}$$

Nótese que los factores 0.0319 y 0.0136 son extraídos de de la tabla de fricción para tubería de acero y PVC respectivamente.

Al calcular el caballaje del motor para esta aplicación resulta:

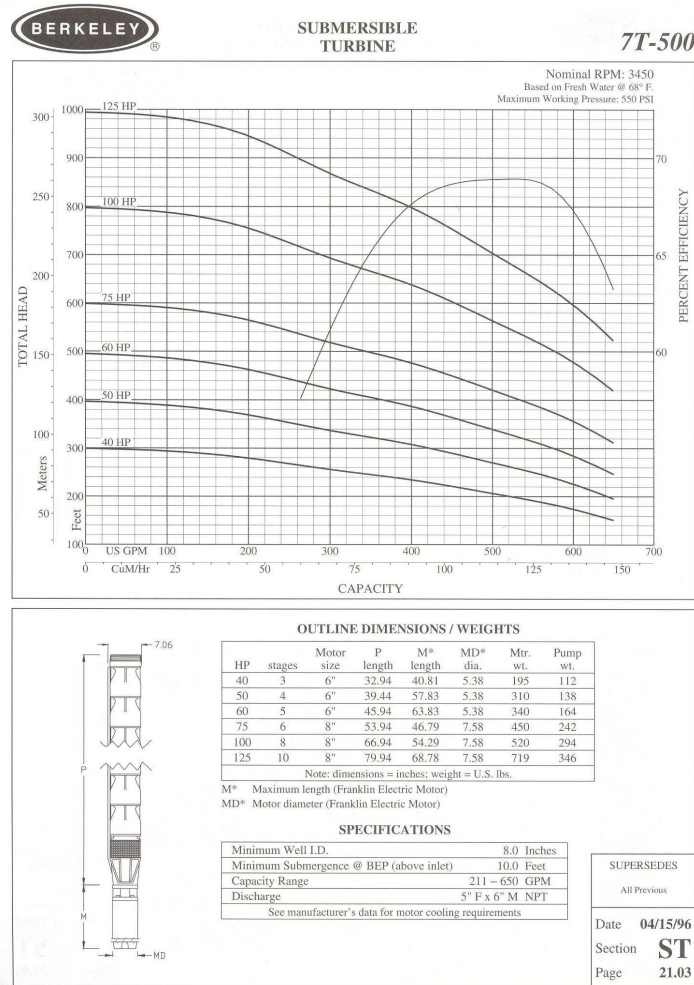
$$\text{BHP} = (500 \times 548) / (3,960 \times 0.65) = 106.45 \text{ HP}$$

Al buscar en una curva de bombas según figura 14, se tiene la bomba modelo 7T100-500 para producir 510 GPM contra 550 pies de CDT. La bomba tiene un diámetro nominal de 7 pulgadas, pero el motor sumergible de 100 HP, su diámetro nominal es de 8 pulgadas, lo que impide instalar este equipo dentro del pozo de 8 pulgadas.

Además, un pozo de 8 pulgadas de diámetro permite en la práctica instalar tubería de columna de hasta 5 pulgadas, pues la copla de la tubería de 6 pulgadas es casi de 8 pulgadas externas, teniendo problemas, tanto para ser instalada dentro del pozo, como para prensar y cortar el cable sumergible para energizar el motor.

En virtud de esta limitante, se hace necesario, rediseñar el equipo, para bajar el caballaje del mismo, buscando así utilizar un motor y eventualmente una bomba de menor diámetro. Esto implicará bombear a la cisterna junto al brocal del pozo, para luego rebombear desde esta hacia la cisterna elevada, ver figura 15.

Figura 14. Curva característica de bomba berkeley modelo 7T100-500

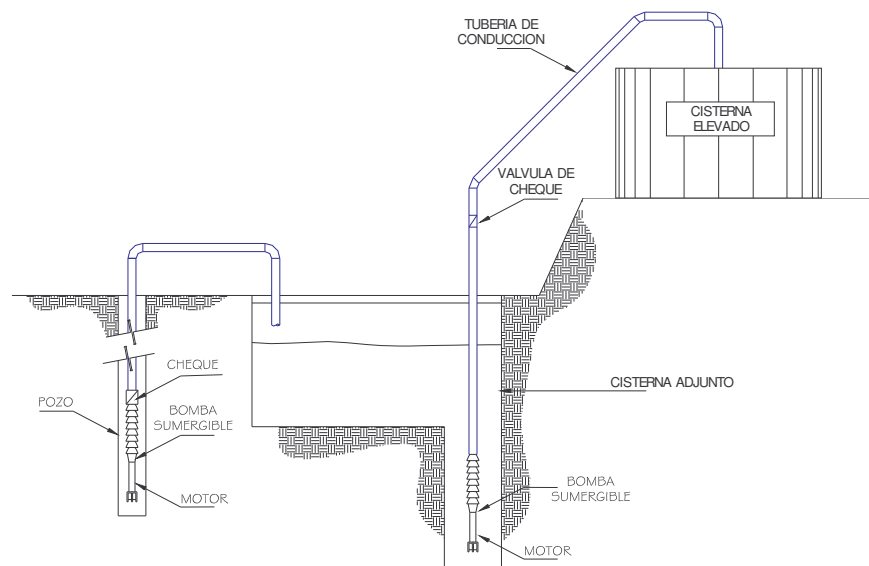


Fuente: Catalogo de bombas berkeley

La CDT variará entonces, pues bajaremos el caudal de explotación a 380 GPM, ya que con este caudal el diámetro de la tubería es de 5.1 pulgadas, que permitirá físicamente instalar el cable sumergible paralelo a dicha tubería.

Según la figura 15, se requerirán dos equipos sumergibles en el sistema, es decir, uno dentro del pozo y otro de menor potencia dentro del cisterna adjunta a dicho pozo, para el rebombeo hacia la cisterna elevada.

Figura 15. Sistema de bombeo sumergible de cisterna adjunta a cisterna elevada



Fuente: Elaboración propia

Es necesario calcular una proyección de nivel dinámico, pues el pozo no tendrá el mismo nivel dinámico si se explota cerca del caudal de producción, que si se explota a producción menor, esto con el objeto de optimizar el PIB, la fricción de la tubería de descarga y los costos del cable sumergible, dicha proyección nos da el nuevo nivel de bombeo teórico (NBT):

$$\text{NBT} = \text{NE} + (((\text{NB}-\text{NE}) \times \text{Qd}) / \text{Qp})$$

Donde NE es el nivel estático en pies, NB el nivel dinámico a producción plena también en pies, Qd es el caudal deseado en GPM y Qp el caudal a producción plena en GPM.

$$NBT = 80 + (((333-80) \times 380) / 517) = 265.96 \text{ pies, redondeado a 266 pies.}$$

Tenemos que considerar el nuevo PIB a 366 pies, por la tubería será de 360 pies.

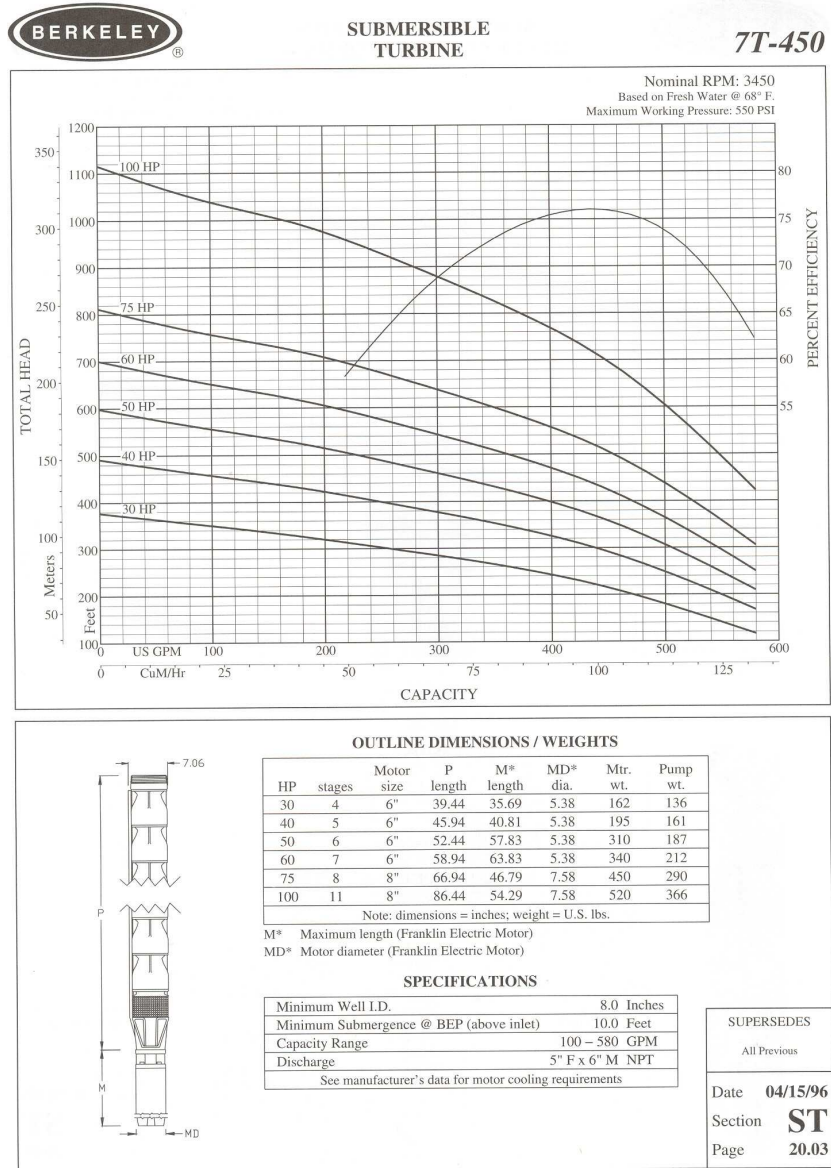
$$\text{Entonces CDT} = 266 + 147 + 360 \times 0.0178 = 419.41 \text{ pies, redondeado a 420 pies.}$$

$$\text{De manera que BHP} = (380 \times 420) / (3,960 \times 0.65) = 62 \text{ HP.}$$

Al revisar la curva de Bomba Berkeley modelo 7T50-450, se tiene que con una CDT de 420 pies la bomba produce 360 GPM y con 440 pies la bomba produce 340 GPM con 72% de eficiencia. Esto nos permitirá diseñar el equipo de bombeo con un motor sobredimensionado, es decir bomba de 50 HP con motor de 60 HP, compensando la limitante de un enfriamiento débil, ya que no es posible usar funda de enfriamiento con una bomba de serie 7 pulgadas dentro de pozo de 8 pulgadas.

Se ha dimensionado el equipo sumergible de bombeo, ahora es necesario diseñar y seleccionar los demás componentes del sistema, como son el cable sumergible, las válvulas de cheque, la línea de aire para monitoreo de niveles, el sello sanitario, el collarín de soporte, el codo de descarga y el panel de control. Se determinó que la tubería de columna de descarga es de 5 pulgadas, entonces el sello sanitario, el collarín de soporte, las válvulas de retención de columna y el codo de descarga serán también de ese diámetro.

Figura 16. Curva característica de bomba berkeley modelo 7T50-450



Fuente: Catalogo de bombas berkeley

El cable sumergible se selecciona según el PIB más 20 pies de tolerancia por cualquier eventualidad, es decir si PIB es 360 pies, la longitud del cable será de 380 pies, se selecciona por medio de tablas del fabricante de cables sumergibles (ver tabla I) en pagina siguiente, o se calcula según el método descrito con anterioridad en el punto 4.4.2.

Para poder medir con cierta frecuencia los niveles del pozo, se hace necesario el uso de una manguera plástica de $\frac{1}{4}$ de pulgada, conocida como línea de aire, se instala paralela a la tubería de columna del pozo y del cable sumergible, sirve para poder inyectar aire a presión a esta y luego traducir, por así decirlo, la carga en libras por pulgada cuadrada a pies de carga, tanto con la bomba operando (nivel dinámico) como sin operar (nivel estático).

En este caso, se aplicará el oxígeno a cierta presión, que multiplicadas por el factor 2.31 se convertirán a pies de carga, a esto se le resta el punto de instalación de la bomba de 360 pies quedando el valor en pies de nivel dinámico si la bomba está operando al inyectar el oxígeno o bien, el nivel estático si el equipo esta sin operar.

Existe también otro método de medición de niveles, con una sonda especial que se introduce siempre de manera paralela a la columna de descarga. Esta medición con sonda es más precisa que la línea de aire, pero es más cara. Además debe dejarse previsto un tubo de PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada, que en este caso quedaría muy ajustado comparándolo con la línea de aire.

Para la selección del cable sumergible se utiliza la tabla del fabricante, en este caso, para la potencia de 60 HP a 380 pies de ubicación, con un voltaje trifásico de 460 voltios, el calibre a seleccionar es 4 AWG.

El interruptor termomagnético, se selecciona, multiplicando la corriente máxima del motor por el factor 1.5, en este caso $91 \times 1.5 = 136.5$ Amperes, que tienen por inmediato superior 150 Amperes.

Por el nivel de corriente y tamaño de los componentes, se selecciona el gabinete metálico T-3 de 8" x 20" x 27", para tener suficiente espacio para ventilación de los componentes del panel de control.

Se requiere una separación galvánica del circuito de fuerza con el circuito de mando, para lo que se utiliza un transformador de mando de 100 VA con sus dos interruptores termomagnéticos de 4 Amperes.

El protector de fases es un componente de mando, que independiente de la potencia del motor, protegerá contra sobrevoltaje, falta de fase y cambio de la secuencia de las fases. Es decir, cambio de giro.

Igualmente, el relé de demora es un retardador para proteger contra arranques intermitentes, que pueden dañar el motor, también independientemente de su potencia.

Los elementos de mando y señalización se diseñan para el nivel de voltaje secundario del transformador de mandos de 100 VA (su función está descrita en el inciso 4.3.5).

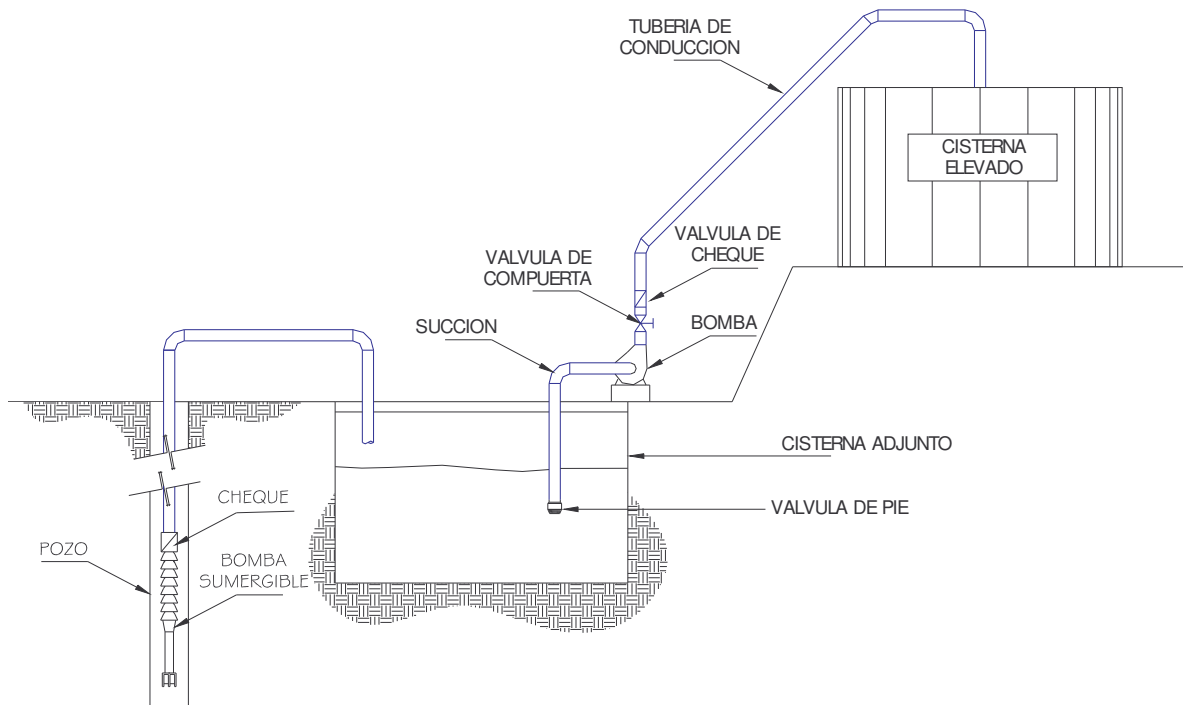
El supresor de picos estará dimensionado para el nivel de voltaje de línea del sistema, pero, en el mercado local existen para 600 Volt.

5.1.2. Rebompeo de cisterna intermedia hacia tanque principal elevado

5.1.2.1 Utilizando bomba centrífuga

En este caso, se dispone de una cisterna de 300 m³, literalmente junto al brocal del pozo, para poder reducir el caballaje del motor dentro del pozo y partir la potencia total del sistema, ver figura 17.

Figura 17. Sistema de bombeo centrífugo (de superficie) de cisterna adjunta a cisterna elevada



Fuente: Elaboración propia

Se calculó en el inciso 2.2.2 la máxima profundidad de la succión de un equipo de bombeo centrífugo, que en la práctica viene a ser de 6 metros, salvo que se usen dispositivos especiales, llamados inyectoros, en ciertos modelos de bombas la profundidad de la succión puede alcanzar hasta los 30 metros.

El diseño de un equipo centrífugo de bombeo es bastante similar al de un equipo sumergible como el del pozo, que se diseñó anteriormente.

Es decir, para estos equipos, la CDT se determina con la misma ecuación haciendo nulos tanto el nivel dinámico o de bombeo como la fricción de la tubería de columna dentro del pozo.

Para este caso, se considerarán únicamente la fricción del recorrido de la cisterna junto al pozo hacia la cisterna en la parte elevada del proyecto.


En este caso, la CDT queda determinada por:

$$\text{CDT} = (0) + (147) + (0) \times 0.0319 + 3,936 \times 0.0136 = 200.53 \text{ pies.}$$

El siguiente paso será seleccionar una bomba que produzca 380 GPM contra 220 pies de CDT, contemplando una tolerancia de 10% por accesorios.

La bomba centrífuga modelo B2 ½ ZPL es la bomba indicada para esta aplicación y se puede seleccionar con la ayuda de la curva característica en la figura 18. Se puede observar la eficiencia del orden del 67%.

Figura 18. Curva característica de bomba berkeley modelo B2 1/2 ZPL



BERKELEY PUMPS

TYPE "B" RATING CURVES

MOTOR DRIVE

CURVE 4075

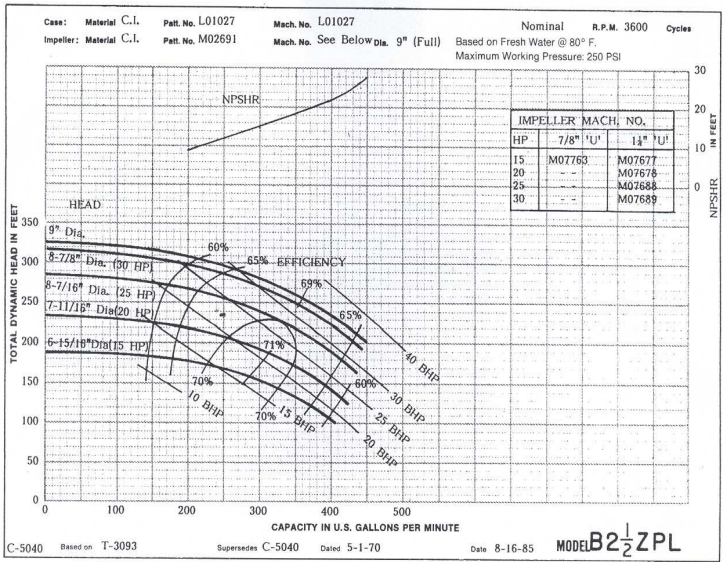
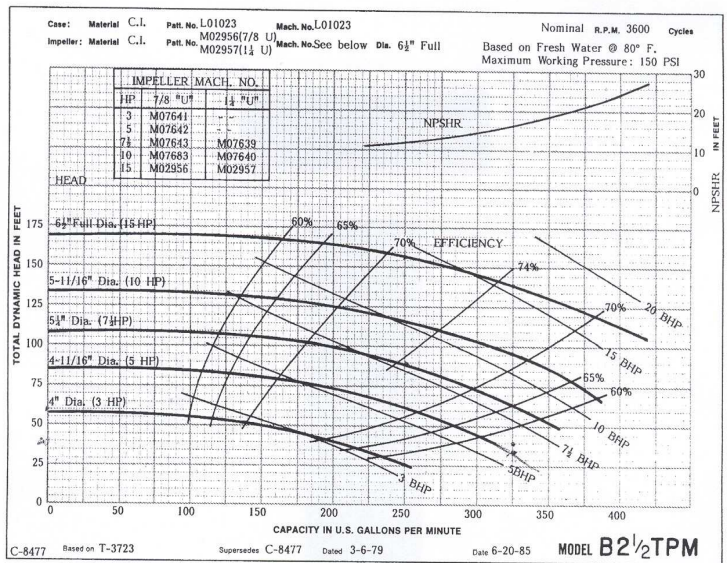
DATE 1-27-89

PAGE 4.01

SUPERSEDES

Curve 4075 Page 4.01

Dated 1-2-86

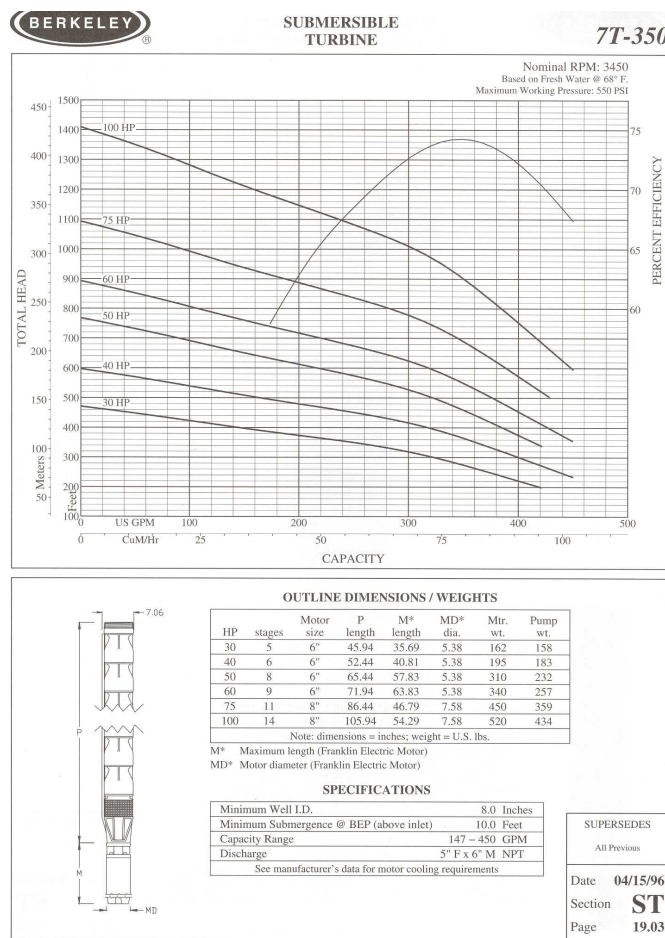


Fuente: Catalogo de bombas berkeley

5.1.2.2 Utilizando bomba sumergible

El uso de equipo sumergible es otra alternativa para el rebombeo desde la cisterna junto al pozo hacia la cisterna elevada según figura 15. Este equipo se debe calcular de manera similar al equipo centrífugo del apartado anterior, es decir anulando la carga del nivel dinámico y la carga por la fricción de la tubería de columna de descarga.

Figura 19. Curva característica de bomba berkeley modelo 7T30-350



Fuente: Catalogo de bombas berkeley

De manera que, al calcular el equipo sumergible, la CDT y el caudal son los mismos valores, pero, al seleccionar el equipo adecuado por medio de la curva característica, se pueden encontrar variaciones en el caudal, según el modelo de la bomba.

Por ejemplo, en la figura 19 se puede observar que la bomba modelo 7T30-350 es capaz de producir 400 GPM contra 220 pies de CDT con eficiencia del 72%.

Esta bomba es una buena opción que no sufre daños a la hora de una fuga en el cuarto de bombas.

Es decir, a la hora de inundarse el cuarto de máquinas por alguna ruptura de tubería o accesorio, este equipo no sufre ningún daño, pues estará de todas maneras sumergido en una cavidad especial en la cisterna de rebombeo. Dicha cavidad es dimensionada acorde al equipo sumergible, aunque suele ser una fosa o cavidad en forma cilíndrica como un pozo manual (diámetro aproximado de un metro y tres metros de fondo), que está ubicado en una de las esquinas de la base del reservorio, para poder desde allí bombear hacia la cisterna elevada en la parte alta del proyecto, hacia donde se desea rebombear.

5.2 Análisis económico del equipo centrífugo

Se solicitó una cotización escrita a una de las empresas especialistas en equipos de bombeo para agua, con el afán de tener un valor total de un equipo centrífugo de bombeo para el rebombeo en Prados de Villa Hermosa, es decir, el equipo capaz de producir 380 GPM contra 220 pies de CDT.

La propuesta económica que incluye la bomba marca Berkeley modelo 2 ½ ZPL, con 67% de eficiencia acoplada a un motor trifásico de 40 HP, 480 Volt con sus accesorios de succión, como válvula de pie, accesorios de descarga, como válvulas de compuerta y de cheque y todos sus controles eléctricos, asciende a cincuenta y siete mil trescientos trece quetzales con dieciocho centavos (Q. 57,313.68) ver tabla III pagina 80.

5.2.1 Ventajas

5.2.1.1 Técnicas

- Las bombas centrífugas tienen ciertas ventajas técnicas como por ejemplo, su fácil instalación.
- El mantenimiento preventivo o correctivo suele ser bastante cómodo y rápido.
- Son ideales para aplicaciones donde los intervalos de arranque y paro son variables, es decir no importa mucho su arranque continuo, por esta razón los sistemas de bombeo residencial son con bombas centrífugas.
- En el caso de ser instaladas con succión positiva, no presentan el efecto de caída de caudal al bajar el nivel en la succión, esto por la carga neta de succión positiva (NPSH).

5.2.1.2 Económicas

- La inversión inicial es bastante económica frente a otros tipos de bombas.

- El costo de mantenimiento es relativamente barato frente al del tipo sumergible. Por ejemplo el sello mecánico y los cojinetes son bastante accesibles en comparación a los componentes del equipo sumergible.
- Los costos de instalación y accesorios son económicos.
- El rebobinado del motor es económico y factible.
- El costo de sustitución es bastante más accesible.

5.2.2 Desventajas

5.2.2.1 Técnicas

- La principal desventaja de un equipo centrífugo, es la limitación que tiene para succionar el agua a profundidades mayores a los seis metros, es decir, para aplicaciones de succiones profundas y caudales grandes se tiene esta limitante.
- No es posible operar los equipos centrífugos convencionales, en condiciones de sumergencia, ya que esto provoca que se dañen los bobinados del motor.
- Para prolongar la vida útil de estas bombas, se requiere de la construcción de bases bien niveladas, para evitar daños en los cojinetes o en los sellos mecánicos, que es otra desventaja.
- El ruido que provocan estos equipos al funcionar es también un punto en contra, dependiendo de la potencia del motor.

- Requieren de especial cuidado en caso de operar en ambientes con mucho polvo, lo que incide en la falta de ventilación del motor, provocando calentamiento.
- Normalmente disponen de un solo impulsor, lo que las limita a ciertas cargas, comparadas con las que puede trabajar una bomba multietapas.

5.2.2.2 Económicas

- El efecto del descenso del nivel en la succión provoca la pérdida de caudal y a la vez el riesgo de que haya cavitación, con posibles daños frecuentes al impulsor, lo que significará gastos de mantenimiento.
- El efecto antes descrito, también provoca por el descenso de nivel en la succión, caída de caudal, lo que implicará mas gastos en energía eléctrica, para compensar este fenómeno.
- La baja eficiencia produce mayores cargos en los costos de energía eléctrica, es decir, de la ecuación de BHP, a menor eficiencia, mayor caballaje.

5.3 Análisis económico del equipo sumergible

Se solicitó una cotización escrita a la misma empresa especialista en equipos de bombeo para agua, con el afán de tener un valor total de un equipo sumergible de bombeo para el rebombeo en Prados de Villa Hermosa, es decir, el equipo capaz de producir 380 GPM contra 220 pies de CDT.

La propuesta económica que incluye la bomba marca Berkeley modelo 7T30-350, con 72% de eficiencia acoplada a un motor trifásico de 40 HP, 480 Volt con sus tubos de acero galvanizado de 5 pulgadas, 380 pies de cable sumergible calibre 4 AWG, válvulas de cheque y todos sus controles eléctricos, asciende a sesenta y seis mil cuatrocientos setenta y tres quetzales con dieciocho centavos (Q. 66,473.75) ver tabla III pagina 80.

5.3.1 Ventajas

5.3.1.1 Técnicas

- El equipo sumergible es capaz de bombear a alturas bastante considerables, por tener varias etapas.
- Al estar inmerso en el agua, sea en reservorio o en pozo, el equipo sumergible no sufre daños.
- Por tener varias etapas, la eficiencia es bastante alta, lo que redundará en caballos más bajos.
- A estas bombas no les afecta la caída del nivel de succión como en el caso de la centrífuga, pudiendo tener un caudal constante en el punto de descarga.
- En lugar de usar varias bombas centrífugas o multietapas, se puede lograr el efecto de bombeo a alturas mayores con un solo equipo acoplado a un solo motor.

- Se puede instalar directamente en línea dentro de los pozos profundos de gran diámetro, esto para partir la carga y combinar dos bombas dentro del pozo.

5.3.1.2 Económicas

- La eficiencia relativamente alta de los equipos sumergibles implica caballajes más bajos, por tanto, jornadas menores de bombeo con costos óptimos en la factura eléctrica.
- En condiciones normales, el tiempo de vida útil de estos equipos es de cinco años, lo que compensa la inversión inicial.

5.3.2 Desventajas

5.3.2.1 Técnicas

- El uso de cojinetes de solevamiento (*thrust bearing*), hace que con un mal diseño por causa de abatimiento drástico del pozo, es decir mucha diferencia de nivel estático a dinámico, este se dañe, provocando la reparación de este equipo.
- Los motores eléctricos sumergibles son susceptibles a los arranques intermitentes, es decir, con un promedio de tres arranques por hora, existe el riesgo de que el motor se dañe.
- Al bombear en acuíferos productores de arena o bacteria denominada hierro, son bastante susceptibles a dañarse antes del promedio de vida útil.

- Los rangos de tolerancia en los niveles de voltaje son bastante menores que en los equipos centrífugos.
- Son mas susceptibles a las descargas electroatmosféricas, por estar directamente inmersos en el agua.
- Los equipos sumergibles están limitados también por el diámetro del pozo, que impide que un equipo de cierto diámetro pueda ser instalado dentro del pozo, para explotarlo con un mayor caudal.

5.3.2.2 Económicas

- El costo elevado de la inversión inicial, respecto a la centrífuga.
- El costo de mantenimiento correctivo es bastante elevado.
- Los costos de instalación y accesorios son onerosos.
- La sustitución de estos equipos es cara.

Tabla III. Tabulación de costos de equipos para rebombeo a cisterna elevada

| Equipos y artículos | Equipo sumergible (Costo en quetzales) | Equipo centrifugo (Costo en quetzales) |
|-------------------------------|---|---|
| Bomba | Q13,835.00 | Q10,719.50 |
| Motor | Q21,069.00 | Q10,719.50 |
| Accesorios de succión | Q1,602.00 | Q9,238.86 |
| Válvula de cheque | Q3,655.00 | Q3,655.00 |
| Válvula de compuerta | Q0.00 | Q1,377.00 |
| Columna de descarga | Q2,800.00 | Q1,411.27 |
| Sello sanitario | Q248.00 | Q0.00 |
| Cable sumergible | Q1,441.80 | Q0.00 |
| Collarín | Q1,430.40 | Q0.00 |
| <i>Manifold</i> de descarga | Q5,227.46 | Q5,227.46 |
| Panel de control | Q7,165.09 | Q7,165.09 |
| Accesorios misceláneos | Q4,500.00 | Q4,500.00 |
| Mano de obra técnica | Q3,500.00 | Q3,300.00 |
| Costo total del equipo | Q66,473.75 | Q57,313.68 |

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

1. Las bombas centrifugas (de superficie) no son capaces de bombear enormes caudales a alturas considerablemente elevadas, ni desde grandes profundidades, a diferencia de las sumergibles. Esto por la limitante de succión de hasta seis metros por la carga neta de succión positiva (*NPSH*) y que normalmente disponen de una sola etapa.
2. Debido a la variación de nivel del agua en la succión, limitada a seis metros, las bombas centrifugas (de superficie) son más propensas a sufrir daños por cavitación que las sumergibles.
3. Los equipos centrífugos de bombeo, de superficie, son menos eficientes que los sumergibles, provocando esto la necesidad de utilizar motores eléctricos con mayor potencia y por lo tanto, mayores costos de operación.
4. Los equipos sumergibles de bombeo instalados dentro de reservorio o tanque, presentan la opción de un bajo costo de mantenimiento global respecto a los equipos centrífugos, de superficie. Por ejemplo, asumiendo un período de vida útil promedio de cinco años para ambos equipos, al equipo centrifugo se le debió haber realizado mantenimiento correctivo global al motor y controles eléctricos, cambio de cojinetes, retenedores, contactores, etc., mientras que al sumergible solamente a los controles eléctricos.

5. Los costos directos de mantenimiento y sustitución de un equipo sumergible dentro de un pozo mecánico profundo, son onerosos, esto por la necesidad de movilización de grúa especial para extracción y reinstalación del equipo dentro del pozo.

RECOMENDACIONES

1. Para las aplicaciones de rebombeo de un reservorio a otra cisterna elevada, se recomienda usar equipos sumergibles, por su eficiencia elevada y sus costos casi nulos de mantenimiento en el largo plazo.
2. En las aplicaciones de bombeo de reservorio directamente hacia la red, se debe usar equipo centrífugo, esto por la frecuencia elevada de arranque y paro del motor. Ya que, dicha frecuencia dañaría antes al equipo sumergible.
3. Al diseñar un equipo sumergible se debe prestar atención al aspecto del enfriamiento del motor, sea con funda especial o con sobredimensionar la potencia del motor. Esto para prolongar la vida útil de esta máquina eléctrica.
4. Respecto a la protección contra bombeo en seco y al control de llenado de cisterna, tanto para los equipos centrífugos como para los sumergibles, se recomienda implementar preferentemente el sistema de interruptor de flote respecto al de guarda nivel con electrodos. Esto por la economía y versatilidad del flote respecto al electrodo.
5. En los lugares remotos, donde no hay red de distribución de energía eléctrica disponible y existe pozo mecánico con niveles profundos, se recomienda usar equipos sumergibles accionados por grupo generador o sea, planta eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

1. Karassik, Igor J.. **Bombas Centrifugas**. México: Editorial McGraw Hill, 1,996.
2. Martínez Cerezo, Humberto. **Equipamiento de pozos**. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional Lerma-Balsas. México, 1,983.
3. McNaughton, Kenneth. **Selección, uso y mantenimiento de bombas**. México: Editorial McGraw Hill, 1,992.
4. **Motores Sumergibles. Manual de aplicación, instalación y mantenimiento**. Franklin Electric. Estados Unidos de América, 1,984.
5. **Figuroa Caballeros, Mario René. Explotación de aguas subterráneas. Su operación, control, mantenimiento y regeneración**. Tesis Ing. Civil. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1,992.
6. **STROEMUNGSMASCHINEN 1 UND 2**. - Máquinas Hidráulicas 1 y 2- *Aufbau und wirkungsweise*. - Construcción y funcionamiento- Willi Bohl, 5 Auflage, 1,990. Vogel Verlag, Wuerzburg.
7. **MANUAL DE INGENIERIA ELECTRICA. Tomo 1 y 2**. Donald Fink. Editorial Mc Graw Hill.
8. **Electrotecnia curso superior**. Editorial Reverté, España.
9. **MAQUINAS ELECTRICAS**. Kosow. Editorial Prentice Hall, México