

La selección de bombas para acueductos de gran longitud^(*)

Por W. C. KRUTZSCH

Ingeniero (MIT)

Próximo a su terminación se extiende, en una longitud de 600 millas, entre Jubail, en el golfo Árábigo, y Riyadh, Arabia Saudí, el mayor sistema de transporte de agua desalinizada del mundo. En muchos países se están considerando proyectos para el transporte de agua por tuberías a través de largas distancias. Al seleccionar bombas para estos proyectos deben tenerse en cuenta los costes iniciales, los de construcción y los de explotación y mantenimiento.

A medida que los centros de población del mundo se van desarrollando y aumentando su aparente nivel de vida se hace imprescindible que aumenten igualmente su abastecimiento de aguas. Raramente, sin embargo, se reconoce esta necesidad de más agua como un prerrequisito del crecimiento y, como consecuencia, las autoridades locales, regionales e incluso a veces nacionales se encuentran en la situación de tener que atender unas demandas que ya han sobrepasado las disponibilidades.

Por ello tienen que perforar manantiales de agua que sólo pueden encontrarse en áreas cada vez más distantes del punto de consumo. Esto requiere entonces el bombeo desde distancias cada vez mayores (a veces exceden las 100 millas) y, según la naturaleza del terreno, a menudo con marcadas diferencias de elevación. De ahí que tanto la fricción en las tuberías como la carga estática contribuyan a que las alturas de las bombas tengan que ser más elevadas, del mismo modo que las necesidades crecientes de los consumidores requieren capacidades superiores. Esta combinación de cada vez mayores alturas y capacidades, obviamente hace que las bombas y sus accionadores tengan que ser de mayor tamaño.

Para complicar más el problema de diseño en aquellos casos en que el agua debe bombearse a través de zonas con elevaciones o montañosas está el hecho de que los terrenos adecuados para construir las estaciones de bombeo pueden estar muy limitados, tendiendo a que las distancias entre estaciones sucesivas sean cada vez mayores, lo que de nuevo aumenta los requisitos en cuanto a altura de la bomba. Esta necesidad de dar la altura y capacidad requerida y al mismo tiempo minimizar los costes generales de la construcción y explotación del acueducto precisa de un cuidadoso análisis de una compleja serie de factores económicos que contribuyen a este coste, muchos de los cuales son mutuamente interdependientes. Casi todos estos factores influyen en la especificación y selección de las bombas que se necesitarán, siendo el propósito de este artículo centrarse en esta materia en particular. Antes de pasar a ello, sin embargo, será instructivo revisar brevemente alguno de los elementos del problema del diseño del acueducto y darse cuenta de cómo estos factores establecen la perspectiva frente a la cual pueden hacerse inteligentemente comparaciones.

Una vez que se ha establecido la capacidad de la línea de conducción (habiendo dado la consideración adecuada a las necesidades de abastecimiento y a las limitaciones del manan-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de noviembre de 1984.

tial) y que se ha trazado la ruta que ha de seguir, es posible comenzar el proceso para determinar el número de estaciones de bombeo que se requieren, la altura total que ha de dar cada una, el tamaño de tubería que se necesita entre estaciones sucesivas y la presión nominal de la tubería. Deben establecerse compromisos entre estos factores, teniendo en cuenta lo siguiente:

1. Cuanto menor sea el número de estaciones de bombeo tanto mayor será la altura total de cada una y tanto mayor la presión nominal de la tubería. Por tanto, los costes de construcción de la estación serían menores, pero aumentarían los costes de la bomba, accionador y tubería.
2. Cuanto mayor sea el tamaño de la tubería entre estaciones, menores serán las pérdidas por fricción y los requisitos de altura de la bomba. Ahora bien, los costes de la tubería tenderán a aumentar, debido a los mayores diámetros, pero esto se verá compensado por la menor presión nominal de la tubería y menores costes de la bomba y el accionador. Lo que es más importante, sin embargo, es que debido a la menor altura requerida, los requisitos de potencia se ven también disminuidos y, por tanto, los costes de explotación son inferiores.
3. Por cada estación de bombeo, ¿cuántas unidades de bombeo hay que prever? y ¿deben instalarse éstas para bombear en paralelo o en serie?

Este análisis debe hacerse sobre la base de la gama de capacidades con las que va a funcionar la línea de conducción a lo largo del tiempo que se proyecta va a durar, en conjunción con los requerimientos de altura total a estas diferentes capacidades.

Puesto que todas las consideraciones que hemos indicado anteriormente se presentan cada vez que hay que desarrollar un nuevo acueducto, y como la interrelación económica entre ellas aparentemente no cambia de manera drástica con el paso del tiempo, a pesar de las veleidades de la inflación, costes del interés, costes

de la energía o cambio internacional de la moneda, parece que en las dos últimas décadas se ha desarrollado un equilibrio económico que ha dado como resultado la estabilización al menos de la altura total de la bomba para los proyectos importantes de acueductos. Una y otra vez vemos especificaciones para estos proyectos que piden bombas con una altura total entre, aproximadamente, 300 m. (1.000 pies) y 450 m. (1.500 pies), cuando se pretende que las bombas funcionen en paralelo. Las capacidades varían un poco más ampliamente, según sea la dimensión del proyecto, pero, frecuentemente, quedan entre 1,5 m³/s. y 4,0 m³/s. Puesto que el funcionamiento en paralelo es más común que el funcionamiento en serie en los sistemas de abastecimiento de aguas, serán las bombas que quedan dentro de esta categoría de las que nos ocuparemos principalmente en este artículo.

Para la gama de alturas totales indicadas anteriormente se ha hecho práctica común el especificar bombas de dos fases (o algunas veces incluso tres fases) para limitar la altura por fase, a un máximo de, aproximadamente, 250 m. (800 pies). Las razones de esta limitación parecen ser en general:

1. La erosión de las partes internas de la bomba es producida por los sólidos arrastrados, que probablemente se encontrarán en un porcentaje razonable del tiempo de funcionamiento de la bomba. Las áreas de mayor preocupación son la entrada y salida del impulsor, los álabes del difusor (cuando lo lleva) y los aros rozantes. El grado de desgaste en todas estas zonas, excepto en la entrada del impulsor, serán proporcionales a la altura por fase, lo que hace que esto sea una característica de funcionamiento que sea deseable limitar. El grado de desgaste en la entrada del impulsor se ve influenciado por otras varias condiciones, pero puesto que las velocidades son aquí considerablemente más bajas que en las otras áreas que hemos citado, será menos severo cuando el impulsor está debidamente diseñado y la bomba opera dentro de los límites de

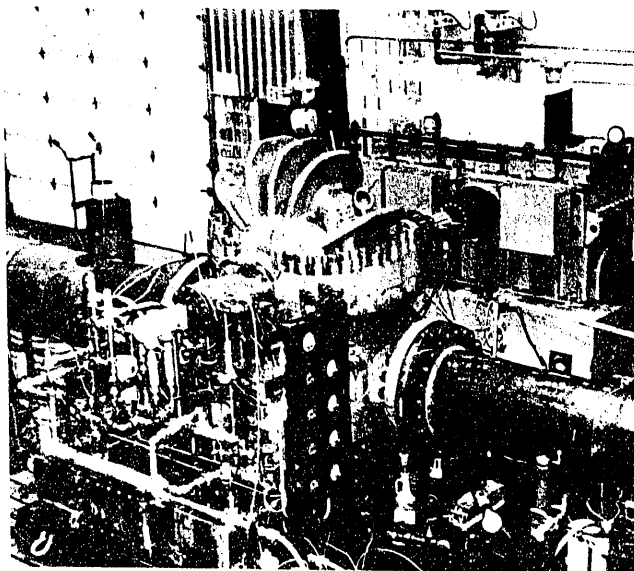
capacidad especificados por el fabricante.

2. Flechas dinámicas del rotor.—Debido a que la distancia entre cojinetes es relativamente larga en las bombas de dos y tres fases, la flecha del eje es normalmente significativa. Las flechas estáticas pueden acomodarse mediante diversas modificaciones de diseño y fabricación, pero la rigidez relativamente baja del eje continúa siendo un problema, debido a las flechas dinámicas que pueden producirse durante la puesta en marcha o parada al funcionar a capacidades que estén significativamente por encima o debajo del punto de mejor rendimiento. Aquí, de nuevo, cuanto mayor es la altura por fase mayores serán probablemente las flechas dinámicas.

Afortunadamente, el problema de la erosión no existe siempre, e incluso cuando es así no implica necesariamente que hayan de usarse bombas multifásicas. En verdad, en ambas circunstancias pueden emplearse bombas monofásicas, que pueden ofrecer muchas importantes ventajas sobre las multifásicas. Consideremos primero el caso en el que se va a bombear únicamente agua limpia, de manera que la erosión no es un problema serio, y la altura total de la bomba hasta 450 m. (1.500 pies) puede desarrollarse con una sola fase. Para que esto no asuste al no iniciado, permítaseme indicar que actualmente las bombas monofásicas de alimentación de reactores nucleares se construyen regularmente para el doble de esa altura.

La primera estación de bombeo con este sistema sería probablemente una instalación de baja velocidad y baja altura para limitar el NPSH requerido en la fuente de abastecimiento y para dar los mayores niveles que necesitan las bombas de la línea principal, pudiendo estar localizada la primera serie de ellas en la misma estación con las bombas de refuerzo. Consiguientemente, las estaciones de bombeo en paralelo a lo largo de la línea utilizarían todas bombas monofásicas de gran altura, que tendrían las siguientes ventajas sobre las bombas multifásicas:

1. Inferior coste de la bomba.—Existe no



Una gran bomba para el acueducto de 600 millas de longitud (965 km.) de Arabia Saudita se somete a pruebas intensivas en un moderno banco de pruebas en Taneytown, MD. En el acueducto para agua desalinizada se están instalando 24 bombas, además de ocho bombas de refuerzo. La selección adecuada de la bomba es fundamental para el éxito en los acueductos de gran longitud.

solamente el menor coste inherente al uso de una sola fase en lugar de dos o tres, sino que para dar la misma altura total con una sola fase emplearíamos mayor velocidad rotativa, reduciendo así el par de arranque y el diámetro del eje, y los costes relacionados con esto, tales como acoplamientos, cojinetes, cierres, etcétera.

2. Inferior coste del accionador, igualmente debido a la mayor velocidad de funcionamiento.
3. La probabilidad de un mejor rendimiento, tanto por la característica de su construcción como por su funcionamiento durante la vida de la bomba, lo que resulta en unos costes de explotación inferiores. El mejor rendimiento inicial se deriva del uso de un colector sencillo y eficaz de doble voluta en comparación con el acostumbrado difusor de álabes múltiples y de las pérdidas entre fases en las bombas multifásicas. Incluso en una bomba de voluta de dos fases no puede evitarse algo de pérdida en el

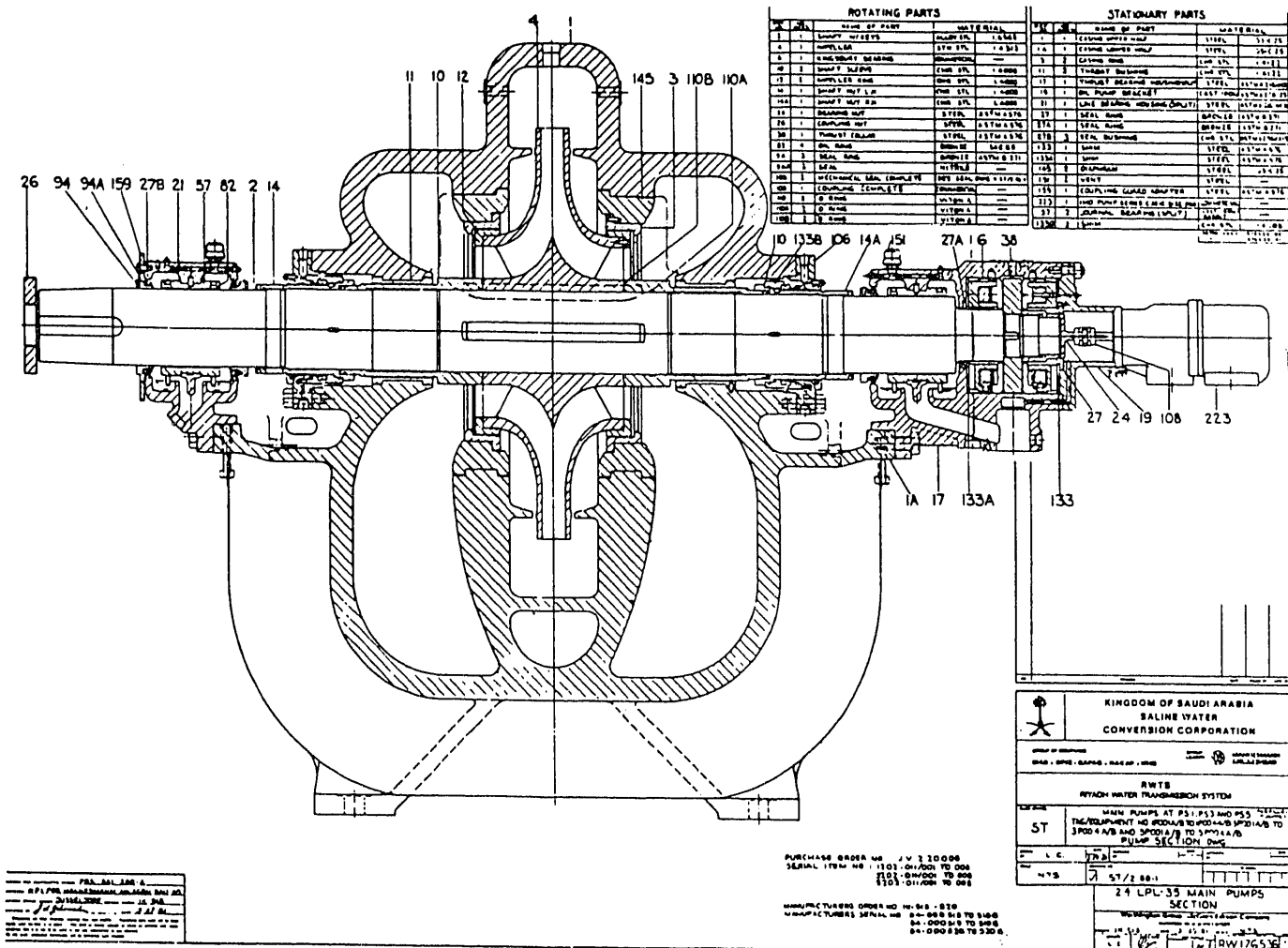


Figura 1.

paso de una a otra. Igualmente se da un rendimiento mayor y más sostenido debido a la rigidez del eje en las bombas monofásicas.

4. Mayor fiabilidad.—Esto es igualmente debido a la construcción rígida del eje y al hecho de que una bomba monofásica tiene menos partes.
5. Menores gastos de mantenimiento.—Debido a su mayor fiabilidad es muy probable que las actividades de mantenimiento sean menos frecuentes, y cuando éste es necesario son menos y más simples las piezas a sustituir. A decir verdad, en un caso extremo la sustitución de un rotor completo de la bomba debe costar la mitad de lo que costaría en una bomba multifásica.

Es importante destacar que las circunstancias y ventajas que hemos mencionado anteriormente no deben considerarse como un caso teórico o como un ejercicio de lógica de un autor: De hecho, la compañía del autor ha completado recientemente la fabricación y envío de 24 bombas monofásicas, cada una de ellas diseñada para 1,6 m³/s. (25.360 GPM USA) y unas alturas que varían entre 379 m. (1.243 pies) y 433 m. (1.420 pies), para ser empleadas en un acueducto de agua de mar desalinizada que se encuentra en fase de construcción en Arabia Saudita. En la figura 1 se muestra un plano de sección de estas bombas.

Pero, ¿qué ocurre si no se trata de agua limpia, sino que nos encontramos con lo que podríamos llamar «agua típica», como la que se encuentra en los ríos, lagos o pantanos y que no

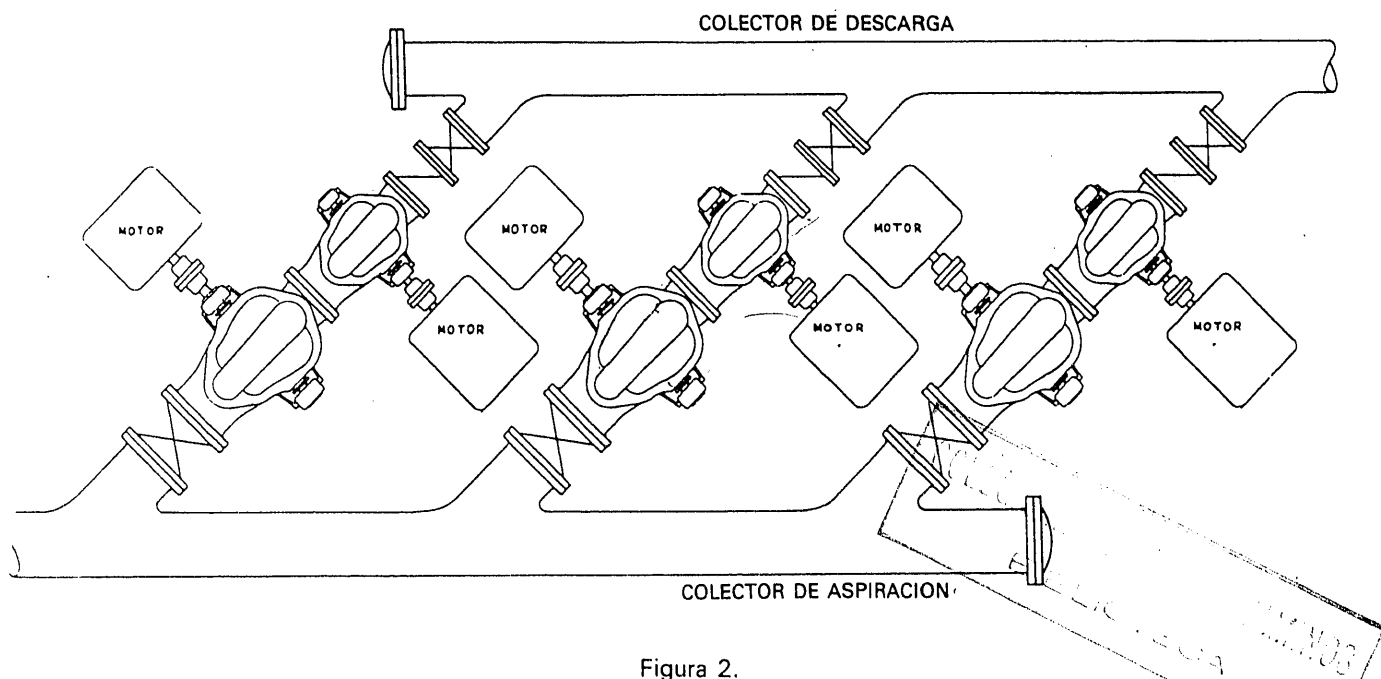


Figura 2.

está sometida a otro tratamiento que la sedimentación natural en el embalse que la contiene? Este agua puede estar sujeta a variaciones estacionales que pueden ir desde el agua clara a considerablemente turbia. Ciertamente, esto nos presenta de nuevo una limitación en altura por fase de unos 250 m. (800 pies), pero ello no significa que las bombas monofásicas queden descartadas. Sencillamente, significa que las alturas típicas de 300 m. (1.000 pies) a 450 m. (1.500 pies) requerirían el uso de dos bombas en serie en lugar de una bomba multifásica. Pero, ¿por qué usar dos bombas cuando una puede hacer el trabajo? Porque hay importantes ventajas en ello, como veremos a continuación:

1. La probabilidad de un mejor rendimiento, tanto por la construcción de la bomba como durante toda su vida de trabajo, por las mismas razones que se han indicado anteriormente en el caso de las bombas que funcionan con agua limpia. Cada una de las dos bombas monofásicas debiera tener una ventaja en cuanto a rendimiento sobre cualquier diseño multifásico, y la instalación puede disponerse de tal manera que la brida de aspiración de la bomba de la segunda fase se desconecte directamente con
2. Mayor fiabilidad, debido a la construcción rígida del eje en las bombas de una sola fase. Hay, por supuesto, el doble número de cajas de empaquetadura o cierres mecánicos y el doble de cojinetes, pero debido a la construcción rígida del rotor inherente a las bombas monofásicas de doble aspiración no es fácil que fallen con frecuencia estos componentes.
3. Menores costes de mantenimiento.— De nuevo esto está en función de la mayor fiabilidad de las bombas monofási-

cas, y del menor coste de las piezas cuando se necesitan. Debe también hacerse notar que el punto de mayor vulnerabilidad a la erosión en los cuerpos de las bombas monofásicas se encontrará probablemente en las lengüetas de la voluta, que pueden prepararse durante la fabricación aplicándoles una sobrecapa de metal duro que si se desgasta puede volver a aplicarse en la misma instalación en las siguientes revisiones. Esto resulta mucho menos costoso que la sustitución de los difusores de álabes, mucho más caros, que suelen llevar las bombas multifásicas.

4. En las unidades grandes los dos accionadores individuales pueden ponerse en marcha secuencialmente, lo que en la mayoría de los casos de los motores accionadores limita la entrada de corriente eléctrica a la mitad de lo que sería en una bomba multifásica.
5. El uso de accionadores separados proporciona la oportunidad de tener distintas velocidades de rotación para cada una de las dos fases, permitiendo el empleo de una velocidad baja para el NPSH mínimo en la bomba de la primera fase (reduciendo así la profundidad de la excavación para la estación de bombeo), y una velocidad más alta en la segunda fase para que resulte un menor coste de la bomba y del accionador.
6. Finalmente, como ambas bombas y motores serán más pequeños y ligeros, la grúa de la estación, así como sus raíles y soportes, pueden ser diseñados para unos límites inferiores, lo que resultará en un coste menor para la construcción de la estación.

Las desventajas potenciales de usar dos bombas en lugar de una sola multifásica son relativamente menores, pero, para tener una perspectiva completa, deben mencionarse. Son:

1. Si por alguna razón hay que hacer funcionar las dos bombas a la misma velocidad que una bomba multifásica, el coste inicial de las bombas será algo mayor. Esta limitación rara-

mente está justificada, pero se ha encontrado en especificaciones en las que la velocidad se ha limitado por razones de NPSH y en las cuales se ha considerado en realidad únicamente la opción de las multifásicas, incluso cuando ofertas de dos bombas hubieran sido aceptables.

2. Debido a que cada unidad puede tener dos motores y con ello dos juegos de controles, los costes de éstos serían superiores. El coste de los motores, sin embargo, será probablemente más bajo cuando se emplea una mayor velocidad para la bomba de la segunda fase y será aproximadamente el mismo si ambas bombas funcionan a la misma velocidad, porque en la gama de tamaños de los que estamos hablando los motores a una velocidad dada se valoran casi sobre la base de un valor constante por caballo.

Puesto que no hay necesidad de colocar una válvula entre las bombas de primera y segunda fase no se aumenta el número de válvulas y bajo ciertas circunstancias, en las que pueden usarse válvulas de aspiración individuales en las dos entradas de algunas bombas multifásicas, el número de válvulas será incluso menor. En general, sin embargo, puede decirse que no existe ni ventaja ni desventaja en cuanto al coste de las válvulas.

Para una mejor comprensión de algunas de las ventajas de las bombas monofásicas sobre las multifásicas hemos hecho una comparación del diseño entre ambas, y los resultados se enumerarán a continuación. La comparación se ha hecho entre una bomba de tres fases diseñada para 4 m³/s. (63.000 GPM USA) y 350 m. (1.150 pies) de altura total a 720 r.p.m., y dos bombas monofásicas diseñadas para funcionar en serie a la misma capacidad, 175 m. (757 pies) de altura total cada una, igualmente a 720 r.p.m.

En este caso la comparación es hipotética, puesto que las dimensiones físicas de ambos diseños fueron establecidas por el autor, aplicando la misma filosofía de diseño y límites de esfuerzos para ambos. En otras palabras, los diseños son representativos de lo que el autor hubiera desarrollado para el concepto de cada

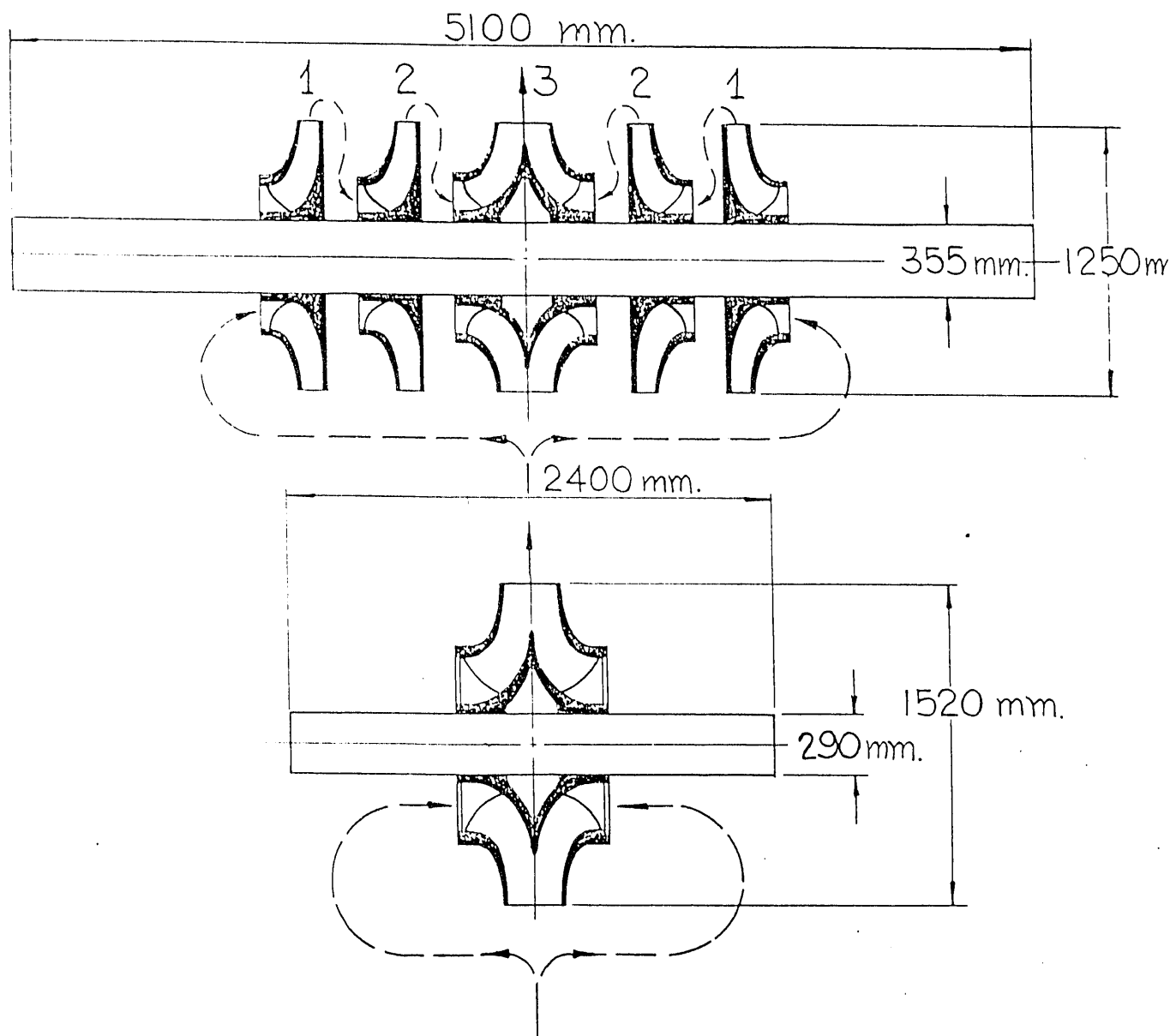


Figura 3.

diseño y se ofrecen o representan como comparaciones reales entre diseños presentados por fabricantes competidores. Todos los valores de diseño indicados son razonables y, por tanto, las conclusiones que se derivan son válidas. La figura 3 nos muestra las disposiciones básicas del rotor y del recorrido del agua tanto para la bomba de tres fases como para la monofásica, e indica el diámetro del eje, su luz y los diámetros aproximados de los impulsores. En el caso de la bomba de tres fases las líneas de puntos que indican el recorrido del agua entre fases serían reemplazadas en la bomba real por difusores

multiálabe, y ya la adición de estos difusores obviamente complica y aumenta el coste de este conjunto rotativo, lo que hace que exceda en valor a dos de los rotores sencillos que se requerirían para las bombas monofásicas equivalentes. Estas últimas, como ya se ha indicado anteriormente, llevan cuerpos de doble voluta y no tienen difusores.

La figura 4 presenta una comparación de las flechas estáticas del eje en la bomba de tres fases y en la monofásica. De ello resulta aparente que a pesar de su mayor diámetro de eje la

LA SELECCION DE BOMBAS PARA ACUEDUCTOS DE GRAN LONGITUD

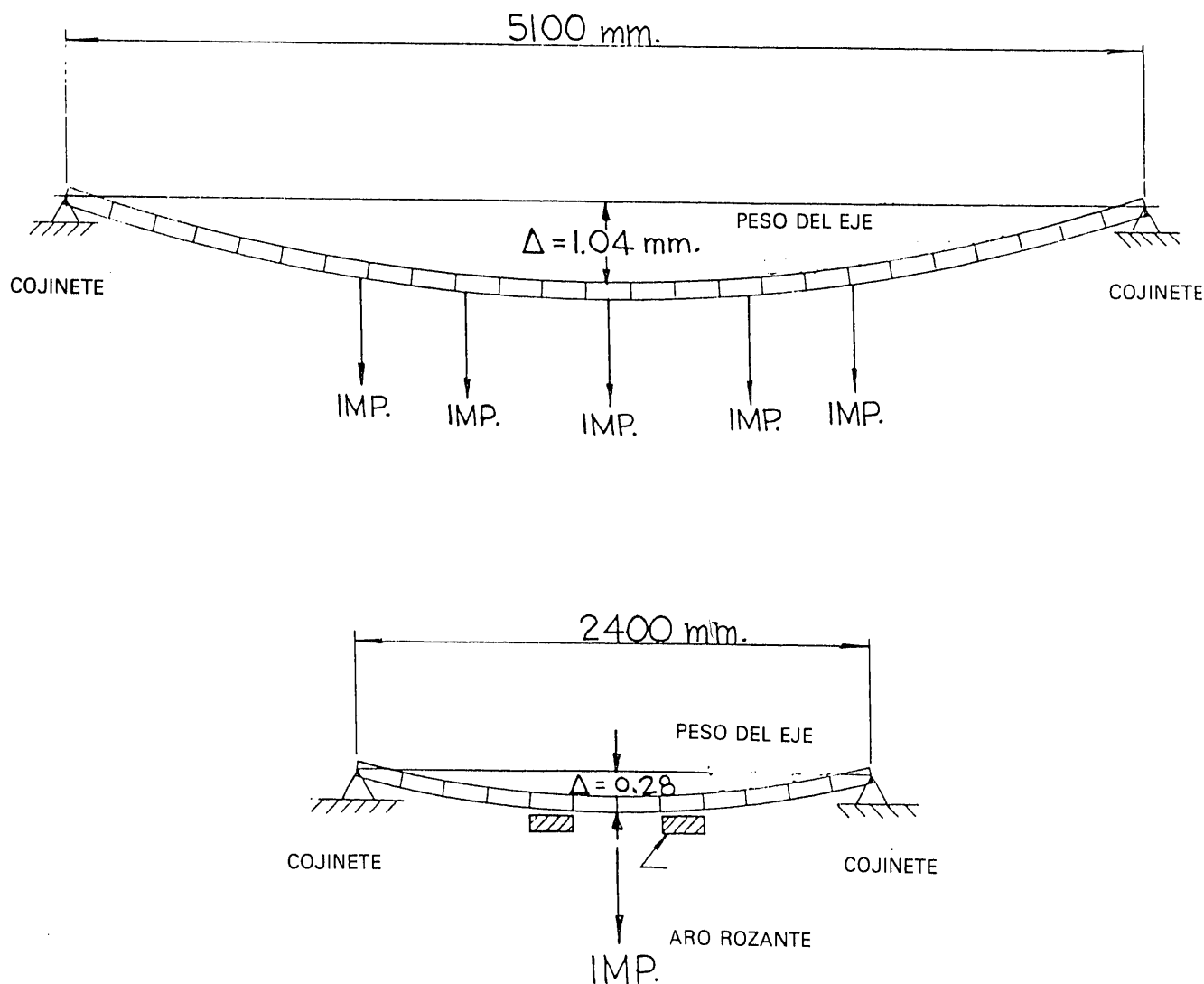


Figura 4.

bomba multifásica tiene un rotor mucho más flexible, lo que lo hace más susceptible de sufrir flechas dinámicas, muy por encima de su ya alta flecha estática.

En todas las turbomáquinas, como en la mayoría de los productos de ingeniería, la sencillez y la robustez son virtudes estimables y ciertamente las bombas monofásicas por las que abogamos aquí poseen estas virtudes. Pero a menos que puedan traducirse en una ventaja general económica resulta difícil que prevalezca la virtud. Y cuando todo está ya dicho y hecho el único factor tangible para establecer la ventaja económica reside en la habilidad de las bombas monofásicas en serie para alcanzar un mayor rendimiento que una bomba multifásica.

La tabla I indica que para las bombas diseñadas para funcionar en las condiciones de servicio mencionadas en la comparación anterior, y para un coste de 0,087 \$/kwh (0,065 \$/cvh) el valor de un punto de porcentaje en el rendimiento a lo largo de veinte años sobrepasará los 2.000.000 \$ por unidad en dólares corrientes. Incluso si tratamos en términos del valor capitalizado en el momento de la compra, basándonos en un interés compuesto del 10 por 100 anual a lo largo de los veinte años, cada punto de porcentaje de rendimiento tiene un valor ligeramente superior a 1.000.000 \$.

Dependiendo de la calidad del agua que se va a bombear y de la erosión que cabe esperar, es también posible determinar, por compara-

ción, los costes de las piezas y los rotores, junto con la frecuencia con que se espera se produzcan las reparaciones o revisiones, siendo las evaluaciones del mantenimiento favorables sustancialmente a las bombas monofásicas. En algunos casos esta evaluación podría ser tan significativa como la del rendimiento, pero ello requiere más supuestos y juicios, haciendo los ejemplos numéricos objetos de debate, por lo cual no vamos a ofrecer aquí ninguno. Esta faceta de una evaluación general, sin embargo, no debe pasarse por alto en un caso real.

Quizá la palabra final que debería decirse en favor de las unidades en serie para aplicaciones en que es grande la altura, sea que no representan una forma nueva o experimental de tratar el bombeo con alturas elevadas, ya que hasta hace veinticinco años se empleaban comúnmente en trabajos de servicio de aguas cuando las alturas totales excedían los 100 m. (300 pies), lo que hasta entonces era el límite máximo virtual de las bombas monofásicas disponibles en el comercio para tales aplicaciones, al menos en tamaños medios y pequeños, a capacidades de hasta aproximadamente 1,0 m³/s (15.000 GPM USA).

Estas unidades, sin embargo, llevaban un sólo accionador y un sistema de tuberías entre fases bastante extenso, lo que hacía que resultasen costosas y requirieran bastante espacio.

Su popularidad disminuyó durante los años 50, al desarrollarse nuevas bombas monofásicas para instalaciones de agua para alturas de hasta 150 m. (500 pies), haciendo que las unidades en serie o las multifásicas resultaran innecesarias para la mayoría de las aplicaciones. Pero muchas de aquellas unidades en serie continúan todavía hoy en servicio como testimonio de la validez del concepto y la fiabilidad del equipo. Considerando la flexibilidad que permite este concepto en el diseño y la selección de la maquinaria de bombeo esperamos que estas unidades vuelvan a emplearse en un futuro próximo en aplicaciones de acueductos con grandes alturas de bombeo.

TABLA 1
EVALUACION DEL COSTE DE LA ENERGIA

Supuestos:

1. Coste del fuel = 35 \$/barril.
2. Potencia calorífica = 18.000 BTU/lb.
3. Rendimiento térmico de la generación de energía = 30 por 100.
4. Condiciones de la bomba =
a — capacidad = 4 m³/s. (63.400 GPM USA).
b — altura total = 350 m. (1.150 pies).
c — rendimiento de la bomba = 90 por 100.

Cálculos:

$$1. \text{ Potencia absorbida} = \frac{63.400 \times 1.150}{3.960 \times 0,90} = 20.460 \text{ CV}$$

$$2. \text{ \$ / CVh} = \frac{35 \times 2.545}{42 \times 6 \times 18.000 \times 0,30} = 0,065$$

3. Valor de un punto de variación del rendimiento por unidad en veinte años de funcionamiento a ocho mil horas por año:

$$= \frac{0,01 \times 20.460 \times 0,065 \times 8.000 \times 20}{0,90} = 2.364.000 \$$$

William C. Krutzsch

Ingeniero Mecánico por el Instituto de Tecnología de Massachussets. A lo largo de su carrera profesional el señor Krutzsch colaboró de forma destacada con el Instituto de Normas del Hydraulic Institute. Asimismo, colaboró con Igor J. Karassik en la redacción de varios «Consultorios de Bombas Centrífugas» y en la sección sobre Bombas Centrífugas del Manual de Mark. También fue coeditor del «Manual de Bombas» publicado por McGraw-Hill. Desde 1949 y hasta su jubilación, estuvo empleado en Worthington, donde fue Ingeniero Consultor y desempeñó distintas funciones de ingeniería dentro de la Compañía, incluyendo las de «Ingeniero Jefe de Bombas Centrífugas», «Jefe de Ingeniería de la División de Bombas y Transmisión de Calor», «Director de Investigaciones y Desarrollo de Bombas» y «Director de Ingeniería».