

Método de análisis comparativo dimensional y de diseño para bombas centrifugas verticales tipo pozo profundo

Vega González, L. R.¹

Fecha de recepción: 19 de julio de 2007

Fecha de aceptación: 15 de julio de 2008

RESUMEN

Frecuentemente en el campo de la evaluación tecnológica se requiere del análisis comparativo de dispositivos tecnológicos semejantes. Este problema es muy complejo, ya que muchas veces los equipos aparentemente son muy parecidos en cuanto a sus dimensiones y geometría, y también tienen una eficiencia y desempeño semejante, sin embargo, no son iguales. Parte del reto metodológico consiste en determinar las dimensiones tecnológicas que por un lado sean los mejores indicadores del desempeño cuantitativo de los artefactos tecnológicos, y que por el otro sean medibles, para poder establecer una comparación apropiada y válida. En este artículo se presenta la metodología resultante de un proyecto patrocinado realizado en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la Universidad Nacional Autónoma de México. La evaluación tecnológica se realizó aplicando elementos de la teoría hidrodinámica y de dinámica de sistemas físicos a la sección hidráulica de los equipos. No se incluyeron otros aspectos eléctricos, ni de software o automatización.

Palabras Clave: evaluación tecnológica, bombas verticales, dimensiones tecnológicas.

Method of dimensional comparative analysis and design for vertical centrifugal pumps

ABSTRACT

The technology evaluation field often requires comparative analysis of similar technological devices. The complexity of the problem resides on the careful differentiation of close efficiencies and performances delivered by equipment with similar geometry and dimensional profiles, but with different structures and appearances. The methodological issue is based on the determination of measurable technological dimensions, understanding this as quantitative technological-performance variables, used to establish a valid and appropriate comparison. This paper presents the methodology from a project carried out at the Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) of the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). The methodology to evaluate technology addressed the hydraulic section of the equipment using the hydrodynamics theory and dynamic systems elements. Neither other electrical aspects nor software or automatization issues were considered.

Keywords: technological evaluation, vertical pumps, technological dimensions.

¹ Coordinación de Vinculación y Gestión Tecnológica, Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, CCADET-UNAM. Email: lrvg@servidor.unam.mx

INTRODUCCIÓN

En el año 2006 una empresa fabricante de bombas planteo por razones estratégicas y de manufactura un proyecto patrocinado al CCADET de la UNAM, para realizar la comparación de algunos dispositivos existentes en el mercado. En este trabajo se presenta la metodología que fue diseñada para realizar la comparación de las características técnicas y tecnológicas de dos bombas verticales de pozo profundo de dos fabricantes diferentes. Una de las dificultades principales era que las características funcionales de las bombas **B_A** y **B_B** comparadas, tales como su potencia, carga de trabajo e inclusive sus dimensiones eran aparentemente similares. Al usar elementos de la teoría hidrodinámica y de sistemas dinámicos se obtuvieron resultados diferentes. Esta metodología puede ser utilizada para realizar la comparación de otros dispositivos electromecánicos, realizando las adecuaciones pertinentes.

Por razones de confidencialidad no se señala el nombre de la empresa contratante ni los modelos de los dispositivos comparados.

Las bombas centrífugas verticales para pozo profundo. Las bombas centrífugas son dispositivos tecnológicos cuyos antecedentes se pueden remontar a más de 1800 años. De hecho, uno de los más famosos inventos del matemático Griego Arquímedes (287-212 AC), fue su famoso “Tornillo de Arquímedes”, que es considerado como una bomba hidráulica primitiva. (Barajas,2003).

Por muchos siglos el desarrollo de los dispositivos para impulsar agua, previos a las bombas centrífugas, fue realizado por medio de la empiria técnica. La ciencia de la hidráulica que dio el soporte para el desarrollo tecnológico de las bombas centrífugas se desarrolló intensivamente hasta después del Siglo XVIII. Hoy en día este conocimiento ha sido compendiado y reportado por varios autores. (Mataix, 1970), (Fox et. al., 1995). En México uno de los autores más importantes sobre el tema ha sido (Viejo Zubicaray, 1981) cuyo libro se ha convertido en un clásico para el diseño, selección e ingeniería de bombas. La primera impresión de este libro fue hecha en 1972, por lo que a la fecha tiene más de treinta y cinco (35) años de publicado.

La tecnología de las bombas verticales de pozo profundo actualmente se encuentra dentro de la Etapa No. 3 de Madurez y Difusión General de la Tecnología, según las propuesta del comportamiento del ciclo de vida de la tecnología. (Foster, 1986), (Vega, 2002). En esta etapa de su ciclo de vida, generalmente se dan innovaciones graduales masivas,

lo que dificulta la evaluación del desempeño tecnológico de este tipo de dispositivos.

Según Viejo, (Op. Cit.), las partes principales de las bombas verticales para pozo profundo son las siguientes: cono de entrada, tazón de acoplamiento, impulsor, tazón de salida, flecha del impulsor y accesorios diversos tales como acoplamientos, empaques, retenes, bujes y anillos.

El tamaño nominal de una bomba centrífuga se determina generalmente por el diámetro interior de la brida de descarga, el diámetro del impulsor y la velocidad del motor. Los siguientes aspectos constructivos y de diseño son fundamentales en este tipo de bombas:

- Se usa el método de los triángulos de velocidad para el diseño y desarrollo de aspas de alta eficiencia el cual está basado en la ecuación de Euler, una de las ecuaciones fundamentales de la hidráulica.
- La innovación tecnológica en el diseño de impulsores ha sido intensa en este dispositivo, los cuales han sido cada vez más eficientes en términos de las velocidades de entrada y de salida hidráulicas.
- El impulsor cerrado tipo cónico de aspas radiales, es del tipo más utilizado actualmente.
- El análisis de similitud es parte fundamental del diseño de impulsores. Los fundamentos del tema de Análisis de similitud hidrodinámica de la Mecánica de Fluidos se atribuyen a Isaac Newton. (Giraldo, 2006).

METODOLOGÍA DE DIMENSIONES TECNOLÓGICAS PROPUESTA

A partir de las consideraciones anteriores, diseñamos una metodología específica para realizar el análisis comparativo dimensional y de diseño entre las bombas verticales de pozo profundo. El diseño metodológico es de tipo semi-cuantitativo; es decir, se trata de juicios intuitivos que se convierten a cantidades numéricas. Este tipo de técnicas difieren de las técnicas estrictamente cuantitativas en el sentido de que no se trata de usar una fórmula compleja única para compilar los datos. (Choi & Kim, 2005). El diagrama de bloques de la metodología se muestra en la **Figura 1**.

El fundamento de la metodología es uso de dimensiones tecnológicas (DT), el cual ha sido muy útil en proyectos de evaluación, avalúo y gestión tecnológica. Una buena definición de las DT permite disminuir la complejidad del problema de evaluación. De hecho, un proyecto de comparación entre

dispositivos tecnológicos es un caso particular de los proyectos de evaluación tecnológica. (Medellín &

Vega, 1995); (Vega, Avilés & Montalvo, 2003).

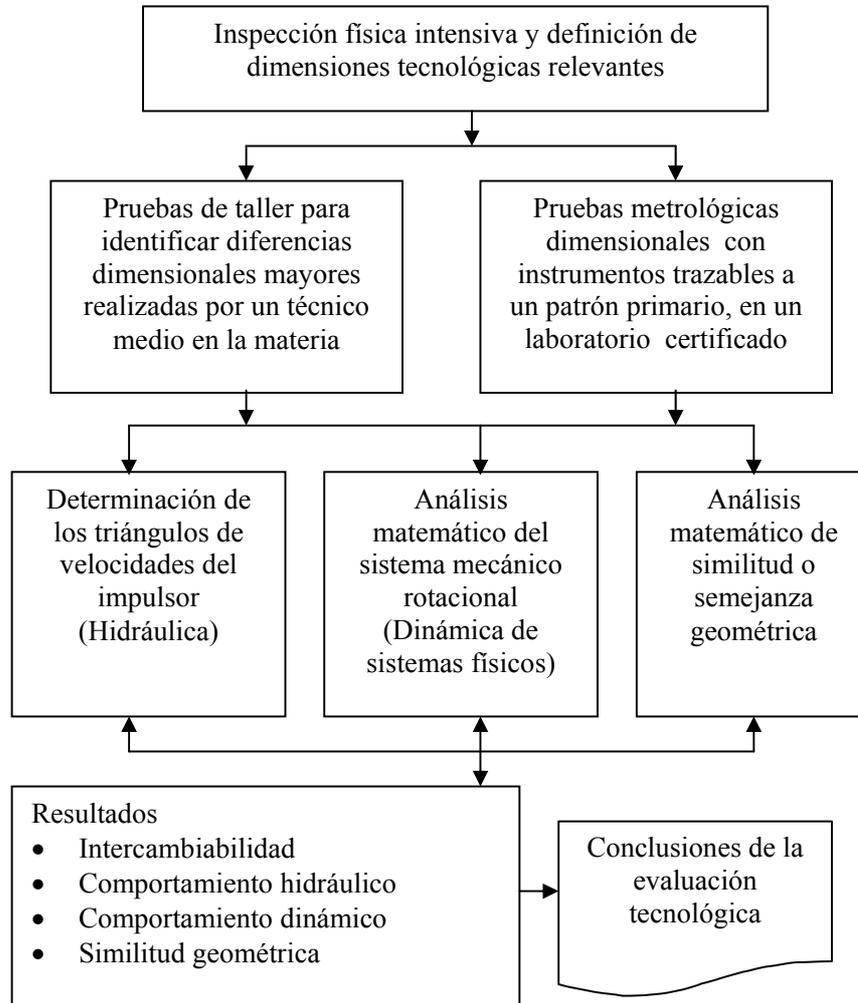


Fig. 1. Metodología empleada para el análisis comparativo de bombas verticales

Fuera de la parte eléctrica propulsora, el desempeño tecnológico del sistema electromecánico de las bombas verticales de pozo profundo depende básicamente de los aspectos geométricos de construcción; del desempeño del sistema mecánico rotacional que se encontrará en movimiento y que está formado por inercias, ejes, chumaceras y bujes, entre otras partes móviles. De hecho, la hidrodinámica depende de la eficiencia y diseño del sistema de impulsión. A partir de estas consideraciones se desprendieron las tres dimensiones tecnológicas (DT) mostradas en la Tabla 1.

Por lo tanto, el desempeño tecnológico total (DT_T) se considera una función de tres dimensiones

tecnológicas (DT_X), que son: $DT_T = f(DT_1 = \text{coeficiente de similitud } \xi, DT_2 = \text{momentum}, DT_3 = \text{velocidad relativa de salida})$

La definición de las dimensiones tecnológicas da origen a tres líneas de trabajo que pueden desarrollarse en paralelo

1. Deben determinarse las diferencias dimensionales del impulsor como elemento fundamental en el desempeño total de la bomba. También se deben determinar las diferencias dimensionales en otros elementos tales como el diámetro y la longitud del eje de cada bomba

- Con la información dimensional se procede a la determinación de los triángulos de velocidad a la entrada y salida de los álabes del impulsor, como variable de comparación de la respuesta hidrodinámica de las bombas
- Finalmente se deben comparar los parámetros dinámicos de respuesta del sistema mecánico rotacional operando en vacío

Análisis Dimensional. Es conveniente que el análisis dimensional de alta precisión sea desarrollado por un laboratorio de metrología certificado. Deben medirse todas las piezas representativas de las bombas B_A y B_B ; especialmente los impulsores y flechas.

Adicionalmente se recomienda que se determinen las diferencias dimensionales mayores. Este trabajo debe desarrollarse por técnicos especializados.

Análisis Matemático. Se sugiere que el análisis matemático formal se realice en tres niveles:

- Comportamiento hidrodinámico: análisis geométrico de los desarrollos de los triángulos de velocidad de los impulsores
- Comportamiento del sistema mecánico rotacional operando en vacío
- Análisis de similitud

Tabla 1. Dimensiones tecnológicas

Dimensión Tecnológica	Aspectos cubiertos
Coefficiente de Similitud ξ	Geométricos
Momentum	Dinámica del sistema rotacional
Velocidad relativa de salida	Comportamiento hidrodinámico del impulsor

Criterios de comparación y prueba. Para poder llegar a una evaluación cuantitativa y cualitativa, se parte de los siguientes criterios:

- Se considerará que *dos bombas son iguales* si al comparar las diferentes dimensiones tecnológicas; es decir, los indicadores de funcionamiento hidrodinámico, de relación dimensional y de comportamiento dinámico del sistema rotacional resulta que todos ellos son iguales.
- Se considerará que *dos bombas son semejantes*, en el sentido descrito por Mataix, (op. cit.) y (Análisis dimensional y semejanza; 2004); si se encuentra que existe algún tipo de relación de proporcionalidad entre las diferentes dimensiones tecnológicas o indicadores. Estas relaciones podrían ser por ejemplo que una sea el cuadrado de la primera, o que se guarde una constante de proporcionalidad.

3. Se considerará que *dos bombas son similares*, en el sentido descrito por Viejo (op. cit) si la proporción obtenida al comparar los diferentes indicadores entre sí, es siempre la misma y esto permite establecer alguna relación geométrica de transformación, o bien definir condiciones de isometría o escala entre las bombas. (Pérez & Jañez, 2006) y (Análisis dimensional y semejanza, 2004).

4. Finalmente se considerará que *dos bombas son diferentes* si al comparar todos los indicadores adimensionales, resulta que no son iguales y no guardan proporción alguna.

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

A continuación aplicaremos esta metodología para la evaluación tecnológica comparativa de las bombas verticales de pozo profundo B_A y B_B . Los datos dimensionales y de construcción obtenidos para las bombas comparadas son:

Tabla 2. Datos dimensionales de las bombas comparadas

Bomba B_A		Bomba B_B	
Peso del impulsor	2.775 kg	Peso del impulsor	2.625 kg
Diámetro del impulsor	16.103 cm	Diámetro del impulsor	16.091 cm
Radio del impulsor	8.05 cm	Radio del impulsor	8.0455 cm
Peso del eje	5.390 kg	Peso del eje	4.680 kg
Longitud eje	84.7 cm	Longitud eje	83.5 cm
Diámetro del eje	3.2 cm	Diámetro del eje	3.0 cm
Radio del eje	1.6 cm	Radio del eje	1.5 cm

Los pesos se midieron con una báscula marca Kwonnee, Rango de 5 kg con resolución mínima de

25 gramos. El diámetro de los impulsores fue medido con micrómetro Mitutoyo con escala de 0 a 150 mm

con precisión de una centésima de mm. Las demás mediciones fueron realizadas con Vernier con una precisión de décimas de mm.

Análisis para la determinación de los triángulos de velocidad de los impulsores

El funcionamiento hidrodinámico de las bombas verticales de pozo profundo depende fundamentalmente del diseño del impulsor de las bombas. El método práctico más utilizado para su determinación parte de la construcción de los diagramas vectoriales y de los triángulos de velocidades que se forman en la base y a la salida de los álabes o aspas del mismo.

Los triángulos de velocidades y ángulos de los impulsores se deben construir a partir de la información dimensional ya obtenida. En la **Figura 2** puede verse que los vectores resultantes de los triángulos de velocidad son: u = Velocidad periférica del impulsor; ω = velocidad relativa del flujo; c = velocidad absoluta del flujo.

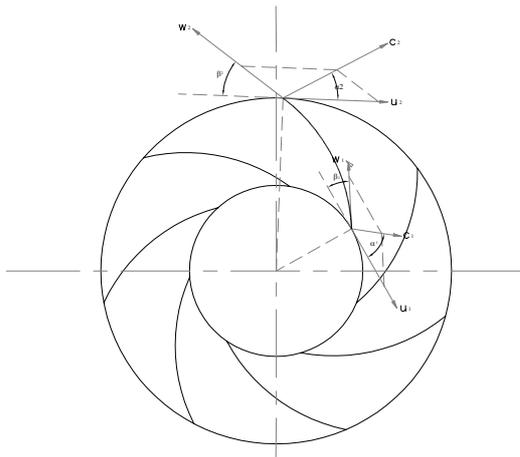


Figura 2. Triángulos de velocidad de los impulsores

Análisis matemático del comportamiento dinámico del sistema mecánico rotacional. En este apartado haremos uso del enfoque de dinámica de sistemas físicos para analizar el comportamiento dinámico de los sistemas mecánicos rotacionales de las bombas **B_A** y **B_B** bajo evaluación. (Ogata, 1978), (Rodríguez, 1987).

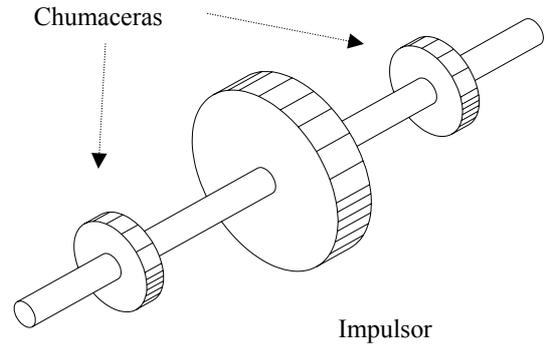


Figura 3. Sistema mecánico rotacional

La suposición básica de este análisis es que se considera que los sistemas rotacionales de las bombas operan en vacío. En la **Figura 3** se muestra que los elementos básicos del sistema mecánico rotacional de la bomba estudiada son el amortiguador, la inercia y el resorte rotacional.

Las chumaceras o los bujes también se consideran amortiguadores mecánicos rotacionales por su roce con la flecha de la bomba.

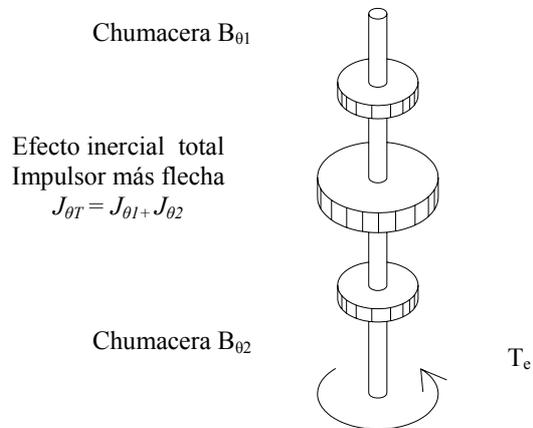


Figura 4. Sistema mecánico rotacional con corrección de efectos inerciales

La inercia mecánica rotacional (**J_θ**) es un elemento que almacena energía; el impulsor de la bomba que se encuentra sujeto firmemente a la flecha se considera como una inercia mecánica rotacional. En el caso estudiado debido a que el peso de la flecha era de más de dos veces el peso del impulsor, hubo que corregir el valor de la inercia por una inercia total como la

suma del efecto inercial del impulsor más la flecha.
Figura 4.

En el caso de las bombas verticales de pozo profundo no se presentan resortes mecánicos rotacionales (K_θ), debido a que no se considera el efecto del rotor del motor eléctrico en la dinámica. Además, generalmente la flecha está fabricada en acero rígido

y su longitud es menor a 1 m. Los efectos de resorte mecánico se presentan en casos de flechas fabricadas con materiales flexibles y/o máquinas rotacionales con distancias de algunos metros entre inercias. Con los elementos físicos rotacionales anteriores, el modelo de los elementos mecánicos rotacionales de la bomba vertical se presenta a continuación.

La ecuación diferencial que representa la dinámica del sistema rotacional de las bombas verticales es:

$$T_e = J_{\theta T} \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \left(B_{\theta 1} + B_{\theta 2} + B_{\theta_{BUJE\ 1}} + B_{\theta_{BUJE\ 2}} + \dots \right) \frac{d\theta}{dt} \dots [1]$$

Considerando un amortiguador mecánico total ($B_{\theta T}$), como la suma de todos los efectos de

amortiguamiento que se pueden presentar por chumaceras, bujes y efectos de roce, entonces:

$$T_e = J_{\theta T} \frac{d^2 \theta}{dt^2} + (B_{\theta T}) \frac{d\theta}{dt} \dots [2]$$

Considerando que la variable principal es la velocidad de la máquina, obtenemos la ecuación diferencial de primer orden:

$$T_e = J_{\theta T} \frac{d\omega}{dt} + (B_{\theta T}) \omega \dots [3]$$

Evaluando las inercias totales para cada bomba, estaremos en condiciones de describir la ecuación diferencial representativa de cada una de ellas.

Cálculo de inercias. La componente vectorial en z del momento de inercia de un cuerpo cilíndrico que gira en un sistema rotacional se calcula por medio de coordenadas polares, y resulta según la expresión:

$$J_z = \frac{MR^2}{2} \dots [4]$$

Así, el momento de inercia depende de la masa y del radio de la pieza cilíndrica sólida que rota sujeta al eje. Calculando la inercia del eje bomba B_A :

$$J_{\theta EB_A} = \frac{(5.390)(1.6)^2}{2} = 6.8992 \quad [Kg - cm^2] \dots [5]$$

Para la inercia del impulsor de la bomba B_A :

$$J_{\theta IB_A} = \frac{(2.775)(8.0515)^2}{2} = 89.94 \quad [Kg - cm^2] \dots [6]$$

Entonces la inercia total de los elementos rotacionales de la bomba B_A es:

$$J_{\theta TB_A} = 6.8992 + 89.94 = 96.846 \quad [Kg - cm^2] \dots [7]$$

De la misma forma calculamos la inercia del eje bomba **B_B**:

$$J_{\theta EB_B} = \frac{(4.680)(1.5)^2}{2} = 5.265 \quad [Kg - cm^2] \quad \dots[8]$$

Inercia del impulsor de la bomba **B_B**:

$$J_{\theta IB_B} = \frac{(2.625)(8.0455)^2}{2} = 84.95 \quad [Kg - cm^2] \quad \dots[9]$$

Entonces la inercia total de los elementos rotacionales de la bomba **B_B**:

De esta forma la ecuación diferencial que modela el comportamiento dinámico de la velocidad de la bomba **B_A** es

$$T_e = 96.846 \frac{d\omega_{B_A}}{dt} + (B_{\theta T})\omega_{B_A} \quad \dots [10]$$

Por su parte, la ecuación diferencial que modela el comportamiento dinámico de la velocidad de la bomba **B_B**, es:

$$T_e = 90.215 \frac{d\omega_{B_B}}{dt} + (B_{\theta T})\omega_{B_B} \quad \dots [11]$$

Calculando las constantes de tiempo de cada bomba.

Para la bomba **B_A**:

$$\sigma_{B_A} = \frac{1}{\frac{B_{\theta TB_A}}{96.846}} = 96.846 B_{\theta TB_A} \quad [seg] \quad \dots[12]$$

Para la bomba **B_B**:

$$\sigma_{B_B} = \frac{1}{\frac{B_{\theta TB_B}}{90.215}} = 90.215 B_{\theta TB_B} \quad [seg] \quad \dots [13]$$

Análisis del comportamiento dinámico de la velocidad de las bombas

Aún si se considera que la aportación de los amortiguamientos mecánicos rotacionales de las dos bombas (**B_{θT}**) son iguales; es decir, que la aportación de las chumaceras y los bujes es igual para ambas bombas, las ecuaciones diferenciales [10] y [11] son diferentes. En consecuencia las constantes de tiempo de las ecuaciones [12] y [13] son diferentes, por lo

que se concluye que las bombas **B_A** y **B_B** analizadas son diferentes en cuanto al comportamiento dinámico de su velocidad operando en vacío.

Análisis de similitud o semejanza geométrica. En esta sección aplicaremos la teoría de la similitud a las bombas verticales para describir el funcionamiento de una máquina comparada con otra máquina de

geometría similar. (Análisis dimensional y semejanza, op. cit.), (Barajas, op. cit.) y Viejo Zubicaray (op. cit.)

El análisis de similitud generalmente se realiza cuando se tiene una bomba prototipo y se quiere verificar el comportamiento de la bomba escalada geoméricamente para producción. Sin embargo, consideramos que el procedimiento puede aplicarse al caso de comparación de bombas del mismo tipo, de

Relación de velocidades de las bombas

$$I_1 = \frac{RPM_{B_A}}{RPM_{B_B}} = \frac{n}{n} \quad \dots[14]$$

Al calcular el cociente del número de revoluciones por minuto (RPM) de las bombas se toma en cuenta la velocidad tangencial del fluido, por lo que este indicador adimensional I_1 establece el comportamiento relativo de algunos aspectos de la hidráulica de las bombas.

$$I_2 = \frac{Q_{B_A}}{Q_{B_B}} = \frac{n}{n} \quad \dots[15]$$

Otro indicador que tiene que ver con la potencia hidráulica de las bombas, es la relación adimensional

$$I_3 = \frac{H_{B_A}}{H_{B_B}} = \left(\frac{n}{n}\right)^2 \quad \dots[16]$$

También se puede calcular la relación entre momentos de inercia, tal y como lo expresa la ecuación D:

$$I_4 = \frac{M_{B_A}}{M_{B_B}} = \left(\frac{n}{n}\right)^2 \quad \dots[17]$$

Finalmente se define una relación conocida como Coeficiente de Similitud (ξ), a la relación entre diámetro de impulsores:

$$I_5 = \xi = \frac{D_{B_A}}{D_{B_B}} \quad \dots[18]$$

Evidentemente es fácil calcular el índice I_5 del Coeficiente de similitud (ξ) comparando los

$$I_5 = \xi_{B_A/B_B} = \frac{D_{B_A}}{D_{B_B}} = \frac{161.03}{160.91} = 1.00074 \quad \dots[19]$$

diferentes fabricantes ya que el supuesto básico del análisis es que las bombas verticales de pozo profundo son básicamente máquinas hidrodinámicas.

La teoría de la similitud o semejanza geométrica se refiere a la determinación de algunos coeficientes dimensionales que se forman a través de relaciones o cocientes. A continuación se presentan los más característicos.

A partir del indicador I_1 se puede definir una nueva relación adimensional entre los gastos que manejan cada una de las bombas, el indicador deberá ser igual ya que el gasto es proporcional a la velocidad de la bomba.

de carga. En este caso la razón de proporcionalidad es el cuadrado de la relación de velocidades:

diámetros de las bombas B_A y B_B , ya que se cuenta con la información dimensional.

RESULTADOS ESPERADOS

Intercambiabilidad de componentes. Debido a sus diferencias dimensionales, principalmente el diámetro del eje, a las diferencias en el paso de las roscas de los tazones de succión y de descarga, determinamos que los distintos componentes de las bombas no son intercambiables entre sí.

Comportamiento hidrodinámico. A partir de la **Figura 5**, se obtienen los resultados de la **Tabla 3** los cuales permiten la comparación de los triángulos de velocidad de los impulsores, tanto a la entrada como a la salida de los dos impulsores de las bombas. Se observan diferencias geométricas en los distintos ángulos y por lo tanto en las velocidades relativas esperadas para las partículas de agua en la operación de las bombas.

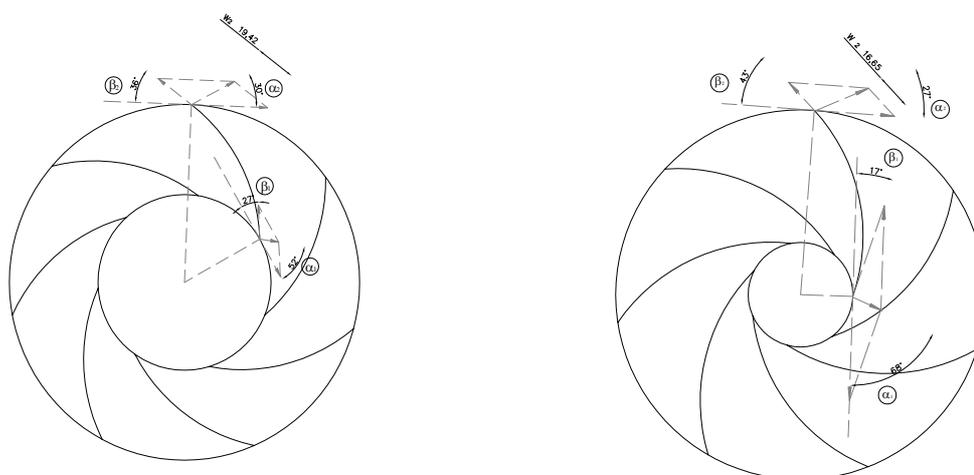


Figura 5. Ángulos de entrada y salida de las bombas **BA** y **BB**

Finalmente de la **Tabla 3** puede verse que **no** existe una relación de proporcionalidad entre las dimensiones geométricas y por lo tanto tampoco

existe proporcionalidad en las velocidades hidrodinámicas.

Tabla 3. Ángulos de entrada, de salida y velocidad de salida de impulsores

Parámetro→ Bomba ↓	β_1	α_1	β_2	α_2	W_2
BA	27.00	52.00	36.00	30.00	19.42
BB	17.00	68.00	43.00	27.00	16.65

Comportamiento dinámico rotacional. Del análisis matemático del comportamiento dinámico del sistema mecánico rotacional de las bombas, concluimos que aún si se considera que la aportación de los amortiguamientos mecánicos rotacionales de las dos bombas ($B_{\theta T}$) son iguales; es decir, que la aportación de las chumaceras y los bujes es igual para ambas bombas, las ecuaciones diferenciales [10] y [11] son diferentes; asimismo las constantes de tiempo de las ecuaciones [12] y [13] son diferentes. Por lo que concluimos que las bombas **BA** y **BB** analizadas son

diferentes en cuanto al comportamiento dinámico de su velocidad operando en vacío.

Prueba de similitud. De acuerdo con los criterios de comparación establecidos en la metodología, para probar la hipótesis de la semejanza entre las bombas **BA** y **BB**, se debe cumplir la proporcionalidad o la igualdad absoluta en las relaciones adimensionales que describen el comportamiento de las tres dimensiones tecnológicas seleccionadas. El **coeficiente de similitud**, que es la relación geométrica dimensional entre los diámetros de los impulsores

debe ser igual o guardar proporcionalidad (ser semejante) a la relación geométrica entre los momentum de inercia, que es una medida del comportamiento dinámico de las bombas, que a su

vez debe ser igual o guardar proporcionalidad (ser semejante) a la relación entre las velocidades relativas de los triángulos de velocidad o perfil hidrodinámico de los impulsores. Esto es, se debe cumplir:

$$\xi = \frac{D_{B_A}}{D_{B_B}} = \frac{M_{B_A}}{M_{B_B}} = \frac{\omega_{B_A}}{\omega_{B_B}} \quad \dots[20]$$

Anteriormente obtuvimos la ecuación (F):

$$\xi_{B_A/B_B} = \frac{161.03 \text{ mm}}{160.91 \text{ mm}} = 1.00074 \quad \dots[21]$$

Por otra parte, el cálculo de la relación de momentum de inercia es:

$$\frac{M_{B_A}}{M_{B_B}} = \frac{96.846 \left[\text{Kg} - \text{cm}^2 \right]}{90.215 \left[\text{Kg} - \text{cm}^2 \right]} = 1.0735 \quad \dots[22]$$

Por otro lado, de la tabla de magnitudes del vector de velocidad relativa (ω_2) de la salida de los impulsores,

que obtuvimos geoméricamente a partir de los triángulos de velocidad, tenemos:

$$\frac{\omega_{2B_A}}{\omega_{2B_B}} = \frac{19.42}{16.65} = 1.1663 \quad \dots[23]$$

CONCLUSIÓN

Resumiendo los resultados obtenidos en las tres líneas de análisis son:

- Las partes mecánicas de las bombas no son intercambiables entre sí.
- No existe una relación de proporcionalidad entre las dimensiones de los álabes de los impulsores, las cuales determinan el comportamiento hidrodinámico de las bombas
- De acuerdo con el resultado del análisis del sistema mecánico rotacional, concluimos que las bombas **B_A** y **B_B** analizadas, son diferentes en cuanto al comportamiento dinámico de su velocidad operando en vacío.
- Finalmente al comparar los diferentes indicadores adimensionales de las tres dimensiones tecnológicas utilizadas para esta evaluación, los cuales son: coeficiente de

similitud (ξ), momentum de inercia y velocidad relativa, tenemos que los tres indicadores señalados son diferentes y no guardan proporcionalidad, según:

$$\xi = 1.00074 \neq 1.0735 \neq 1.1663$$

Del análisis de similitud se concluye que no existe igualdad ni proporcionalidad geométrica para las bombas **B_A** y **B_B** analizadas. El valor de su coeficiente de similitud es diferente al valor del indicador adimensional del comportamiento dinámico rotacional (momentums), el cual a su vez es diferente al valor del indicador adimensional de su comportamiento hidrodinámico. Por las cuatro razones anteriores, concluimos que las bombas verticales de pozo profundo **B_A** y **B_B** analizadas, no son iguales y que la metodología de dimensiones tecnológicas diseñada es perfectamente aplicable en casos de evaluación tecnológica comparativa.

AGRADECIMIENTOS

Por este medio expreso mi profundo agradecimiento al Tec. Pedro Hernández Segovia por su ayuda en la

realización de los dibujos de este trabajo y del informe del proyecto VIN06-02 del CCADET.

REFERENCIAS

Análisis Dimensional y Semejanza, *Mecánica de Fluidos* 67.18, Octubre 21, 2004. Recuperado noviembre 13 de 2006 de: <http://www.fi.uba.ar/materias/6718/problemas/adimensional.pdf>

Barajas P. O. M., (2003), *Ingenierías*, Abril- Junio, Vol. VI, No. 19, Bogotá D. C. Colombia; pp. 47-53.
Bombas Centrifugas, Semejanza Geométrica y Clasificación. Recuperado el 30 de noviembre de 2006 de: <http://www.personales.ya.com/universal/termoweb/mecanicafluidos/pdfs/7mecfluidos.pdf>

Choi O. D., Kim J. S., (2005), Productivity Measurement and Evaluation Models with application to a military R&D organization, *International Journal of Technology Management*, Interscience Enterprises Ltd. Vol. 32, Nos. 3/4. pp. 409-435.

Foster R., N., (1986), *Innovation: The Attacker's Advantage*, Summit Books, New York.

Fox, R. W., Mc. Donald A., (1995), *Introducción a la Mecánica de Fluidos*, Mc. Graw Hill Interamericana, 1ª. Edición. México.

Frankel E. G., (1990), *Management of Technological Change*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.

Giraldo P. A., (2006), Historia de la Hidráulica. Recuperado el 8 de diciembre de 2008 de: [http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/historia/historia de la hidraulica/](http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/historia/historia%20de%20la%20hidraulica/).

Mataix Claudio, (1970), *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*, Ediciones del Castillo, Madrid, España. 3ª Reimpresión.

Medellín C. E., Vega G.L.R., (1995), Evaluación de tecnología herramienta de gestión útil para la transferencia, *Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*, Universidade Federal de São Carlos Brasil. Vol. 2; pp731-735.

Ogata Katsuhiko, (1978), *Systems Dynamics*, Prentice Hall, New Jersey, USA

Pérez T., Jañez L., (2006), Geometría. Recuperado el 30 de noviembre de 2006 de: <http://wmatem.eis.uva.es/~matpag/CONTENIDOS/Geometria/geometria.htm>

Rodríguez Ramírez F, (1987), *Dinámica de Sistemas Físicos*, Editorial Trillas, México

Vega G. L. R; (2003), Evaluación, avalúo y ciclo de vida de la Tecnología, (Parte II), *Revista de Ingeniería, Investigación y Tecnología*, Vol. IV, No. 4, p207-224. México.

Vega. G. L. R., Avilés F., Montalvo T. M., (2002), Evolución y Evaluación Tecnológica de los Protocolos de Comunicaciones, *Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología*, Vol.4 No. 2, Abril-Junio 2003. Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

Viejo Zubicaray M; (1981), *Bombas, Teoría, Diseño y Aplicaciones*, Editorial Limusa México, 3ª Reimpresión.

Este documento se debe citar como:

Vega González, L. R. (2008). **Método de análisis comparativo dimensional y de diseño para bombas centrifugas verticales tipo pozo profundo**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 12-2, pp. 5-15, ISSN: 1665-529X